



Escola Politècnica Superior  
d'Edificació de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

## ARQUITECTURA TÈCNICA PROJECTE FINAL DE CARRERA

### *STATE OF THE ART* I ANÀLISI DE LA FIABILITAT ESTRUCTURAL A L'EDIFICACIÓ

**Projectista:** F. Xavier Sánchez Pérez

**Director/s:** Carles Serrat i Piè, Isabel Serrà Martín

**Convocatòria:** Octubre 2010



## Resum

Aquest treball té per motivació fer una anàlisi del concepte de fiabilitat estructural i estudiar l'aplicació d'aquesta al disseny i càlcul de les estructures d'edificació, tant des d'un punt de vista teòric, amb una introducció dels diferents conceptes relacionats amb la fiabilitat, com des d'un punt de vista pràctic, amb l'estudi de les normatives i l'explicació mitjançant exemples senzills.

L'objectiu de les normatives de construcció es el poder calcular les estructures amb uns coeficients de seguretat que permetin un índex de fiabilitat que ens doni les suficients garanties de seguretat, i a la mateixa vegada, obtenir un disseny òptim i no sobredimensionat. En l'actualitat, el mètode de càlcul d'estructures contemplat a les normatives estatals, el Codi Tècnic d'Edificació (CTE), i la norma EHE, es basen en el mètode dels coeficients parcials de seguretat. Aquest mètode és semi-probabilístic, i això vol dir que les incerteses de les variables que intervenen en el càlcul, com ara les accions i les resistències, s'han estudiat prèviament mitjançant un estudi probabilístic per tal de poder definir uns coeficients de seguretat amb els que calcular amb una garantia de seguretat mínima.

Per a acomplir l'objectiu proposat s'han estudiat els diferents mètodes de càlcul estructural compartint un mateix exemple senzill, que ens permet veure la seva evolució en l'aplicació dels coeficients de seguretat. També ha fet falta una introducció del mètode de càlcul probabilístic i del càlcul de l'índex de fiabilitat de l'estructura.

La dificultat principal rau en la necessitat de definir les variables bàsiques de forma més acurada ja que per fer servir els mètodes probabilistes s'han de considerar les variables bàsiques com a aleatòries i això ens comporta no només conèixer estadístics resum sinó que també es fa necessària la distribució de probabilitat. Per altra banda, en el procés de càlcul s'han hagut d'estudiar tècniques d'aproximació com ara el FOSM, el FORM i el SORM. Al respecte d'aquesta metodologia, el CTE a l'Annex C en fa una introducció així com també l'Eurocodi a l'Annex B.

Com a aportació documental, aquest PFC també fa un repàs dels últims treballs de recerca fets en aquest camp així com del programari disponible relacionat.

A mode de conclusió es proposen dues línies d'actuació: Primerament un major aprofundiment en l'estudi de les variables aleatòries bàsiques que intervenen en el càlcul estructural, com ara l'estudi de les seves distribucions estadístiques i, d'una altra banda, la necessitat d'iniciatives per a sensibilitzar els calculistes d'estructures vers l'ús dels nous mètodes de càlcul.

## Índex

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. Introducció .....</b>  | <b>1</b>  |
| <b>2. Conceptes bàsics de Fiabilitat .....</b>   | <b>2</b>  |
| 2.1. Exemple de fiabilitat .....   | 7         |
| 2.2. Fiabilitat estructural .....  | 9         |
| 2.2.1. Probabilitat de fallada .....   | 11        |
| 2.2.2. Índex de Fiabilitat, $\beta$ .....  | 12        |
| 2.2.3. Índex de Rjanitzzyne-Cornell, $\beta_c$ .....   | 16        |
| 2.2.4. Exemple de càlcul de l'Índex de Fiabilitat $\beta_c$ .....  | 17        |
| 2.2.5. Índex de Hasofer i Lind .....   | 19        |
| 2.2.6. La funció de fiabilitat .....   | 21        |
| 2.2.7. El coeficient de seguretat .....  | 25        |
| 2.3. Fiabilitat estructural a l'edificació. ....   | 27        |
| 2.3.1. Identificació i anàlisi de les incerteses .....   | 28        |
| 2.3.2. Estat límit de servei .....   | 30        |
| 2.3.3. Estat límit últim .....   | 32        |
| 2.3.4. Mètode tensions admissibles .....   | 33        |
| 2.3.5. Mètode del coeficient global de seguretat .....   | 36        |
| 2.3.6. Mètode dels coeficients parcials (semi-probabilístic) .....   | 37        |
| 2.3.7. Mètodes probabilístics .....  | 41        |
| <b>3. Mètodes d'anàlisi de fiabilitat estructural .....</b>  | <b>42</b> |
| 3.1. Classificació segons nivell probabilista .....  | 43        |
| 3.1.1. Mètodes deterministes (o de nivell I) .....   | 43        |
| 3.1.2. Mètodes semi-probabilistes (o de nivell II) .....   | 43        |
| 3.1.3. Mètodes probabilistes (o de nivell III) .....   | 44        |
| 3.1.4. Mètodes de nivell IV .....  | 44        |
| 3.2. Classificació dels mètodes per estimar la Probabilitat de fallada .....   | 45        |
| 3.2.1. FOSM .....  | 45        |
| 3.2.2. FORM, SORM .....  | 45        |
| 3.3. Altres mètodes de càlcul .....  | 46        |
| 3.3.1. Mètode estocàstic d'Elements Finites .....  | 46        |
| 3.3.2. Monte Carlo i Latin Hypercube Sampling .....  | 47        |
| 3.3.3. Random Process, Random Field .....  | 47        |
| 3.3.4. Anàlisi d'interval .....  | 47        |
| 3.3.5. Teoria Fuzzy Logic .....  | 48        |
| 3.3.6. Teoria de Possibilitat .....  | 48        |
| <b>4. La fiabilitat a les normatives. ....</b>   | <b>49</b> |
| 4.1. CTE DB-SE, Annex C .....  | 51        |
| 4.2. EHE-08 .....  | 55        |
| 4.3. Eurocodis .....   | 57        |
| 4.3.1. Eurocode 0: Bases del disseny estructural (EN 1990) .....   | 59        |
| 4.3.2. Eurocodi 2: Projecte d'estructures de formigó. (EN 1992) .....  | 62        |
| 4.3.3. Eurocodi 8: Disseny d'estructures per a la resistència de terratrèmols (EN 1998). ( <i>Design of structures for earthquake resistance</i> ) ..... | 63        |
| 4.4. ISO 2394 .....  | 63        |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 4.5.      | ISO 15686-5 .....   | 64        |
| 4.6.      | ISO 13823:2008 .....  | 64        |
| 4.7.      | Normatives Internacionals .....   | 65        |
| 4.7.1.    | Normatives als EEUU.....  | 66        |
| <b>5.</b> | <b>Recerca al camp de la fiabilitat estructural.....</b>  | <b>67</b> |
| 5.1.      | Treballs de recerca .....   | 67        |
| 5.1.1.    | Metodología Eficiente de Optimización de Diseño Basada en Fiabilidad<br>Aplicada a Estructuras .....        | 67        |
| 5.1.2.    | Aplicació del disseny probabilístic en la fallada d'un moll.....  | 67        |
| 5.1.3.    | Modelos simplificados de respuesta probabilista para la evaluación<br>estructural a flexión de puentes..... | 68        |
| 5.2.      | Instituts i Grups de recerca.....   | 69        |
| 5.2.1.    | Joint Comitee of Structural Safety .....  | 69        |
| 5.2.2.    | ACI, Committee 365: Service Life Prediction .....   | 70        |
| 5.2.3.    | International Federation for Information Processing. IFIP .....   | 71        |
| 5.2.4.    | CSIRO .....   | 71        |
| 5.2.5.    | ASRANET .....   | 72        |
| 5.2.6.    | JICE, Japan Institute of Construction Engineering.....  | 72        |
| 5.2.7.    | Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. ....  | 73        |
| 5.2.8.    | IEMAE, Institut d'Estadística i Matemàtica aplicada a l'Edificació. ....                                    | 73        |
| 5.2.9.    | Centre d'Integritat Estructural i Fiabilitat dels Materials (CIEFMA),<br>Campus UPC a Terrassa.....         | 74        |
| <b>6.</b> | <b>Programari de càlcul d'estructures i Fiabilitat Estructural.....</b>                                     | <b>75</b> |
| 6.1.      | CodeCal.....  | 75        |
| 6.2.      | NESSUS.....   | 76        |
| 6.3.      | CARMEN.....   | 78        |
| 6.4.      | PROBAN .....  | 78        |
| 6.5.      | CALREL.....   | 79        |
| 6.1.      | J-SURESIM .....   | 80        |
| 6.2.      | Programari de RELIASOFT .....   | 80        |
| 6.3.      | Programari amb Mathcad.....   | 81        |
| 6.4.      | Altres programari disponible .....  | 82        |
| <b>7.</b> | <b>Conclusions i línies d'actuació futures.....</b>   | <b>83</b> |
| <b>8.</b> | <b>Bibliografia .....</b>   | <b>84</b> |
| 8.1.      | Bibliografia complementaria .....   | 85        |

## Índex de figures

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Figura 2.1  | Termes involucrats en la Fiabilitat .....   | 3  |
| Figura 2.2  | Relació probabilitat - gravetat.....  | 3  |
| Figura 2.3  | Fotografia de la explosió del Transbordador espacial Challenger.....  | 5  |
| Figura 2.4  | Distribució Normal $N(0,1)$ .....   | 14 |
| Figura 2.5  | Varies distribucions Log-Normal.....  | 15 |
| Figura 2.6  | Índex de Rjanitzyne-Cornell.....  | 16 |
| Figura 2.7  | Esquema de la biga .....  | 17 |
| Figura 2.8  | Índex de Hasofer i Lind.....  | 19 |
| Figura 2.9  | Funció d'estat límit i variables reduïdes .....   | 20 |
| Figura 2.10 | Funció "fiable" i "sense fiabilitat" .....  | 21 |
| Figura 2.11 | Funció de densitat acumulada (CDF).....   | 22 |
| Figura 2.12 | Funció de densitat de probabilitat (PDF).....   | 22 |
| Figura 2.13 | Representació d'un pilar de resistència $R$ sotmès a una càrrega $S$ .....  | 23 |
| Figura 2.14 | Densitat de probabilitat conjunta de les variables $R$ i $S$ . .....  | 24 |
| Figura 2.15 | Funció de densitat de probabilitat (PDF) de la Sol·licitació i Resistència.....   | 25 |
| Figura 2.16 | Funció densitat de probabilitat de les accions ( $S$ ), valors característics i de disseny segons mètodes deterministes. .... | 26 |
| Figura 2.17 | Funció densitat de probabilitat de resposta ( $R$ ), valors característics i de disseny segons mètodes deterministes. ....    | 26 |
| Figura 2.18 | Esquema general dels sistemes de càlcul d'estructures (Pérez, 2000).....  | 28 |
| Figura 2.19 | Grau de l'aptitud al servei $\mu$ , en funció del paràmetre de servei $\lambda$ (CTE DB SE, 2009).....                        | 31 |
| Figura 2.20 | Edifici amb danys per un terratrèmol.....   | 31 |
| Figura 2.21 | Representació de la funció $g(X)$ amb dues variables bàsiques $X_1$ i $X_2$ ; $X = (X_1, X_2)$ .....                          | 32 |
| Figura 2.22 | Parking de la universitat de Califòrnia després del terratrèmol. ....   | 33 |
| Figura 2.23 | Perspectiva dels components del forjat.....   | 34 |
| Figura 2.24 | Esquema de biga amb les càrregues on es pot veure el Moment màxim.....  | 35 |
| Figura 2.25 | Procediment de verificació a través del mètode de coeficients parcials. ....  | 39 |
| Figura 2.26 | Esquema de biga amb les càrregues on es pot veure el Moment màxim.....  | 40 |
| Figura 3.1  | Enfocament mètodes anàlisi. (Haldar, 1999).....   | 42 |
| Figura 4.1  | Mètodes d'anàlisi de la fiabilitat (Marek et al, 2001).....   | 50 |
| Figura 4.2  | Font de les incerteses .....  | 52 |
| Figura 4.3  | Relació entre els diferents Eurocodis (London, 2007).....   | 58 |
| Figura 4.4  | Probabilitat de fallada associada als estats límit.....   | 61 |
| Figura 6.1  | Pantalla d'introducció de dades del programari CodeCal.....   | 76 |
| Figura 6.2  | Diagrama dels components principals de NESSUS.....  | 77 |
| Figura 6.3  | Pantalla d'introducció de dades del programari CARMEN.....  | 78 |

## Índex de taules

|   |    |
|---|----|
| Taula 2.1 Riscs de mort d'activitats habituals (Melchers, 1999) .....                                   | 4  |
| Taula 2.2 Relació entre probabilitat de fallada $P_f$ i l'índex de fiabilitat $\beta$ .....             | 12 |
| Taula 2.3 Classificació de l'índex de fiabilitat .....  | 13 |
| Taula 2.4 Relació entre la probabilitat de fallada $P_f$ i l'índex de fiabilitat $\beta$ .....          | 18 |
| Taula 4.1 Selecció de les distribucions estadístiques .....   | 53 |
| Taula 4.2 Valors nominals, referits a tot el període de servei, per l'índex de fiabilitat requerit..... | 54 |
| Taula 4.3 Hipòtesis per les funcions de distribució dels models probabilistes .....                     | 54 |
| Taula 4.4 valors recomanats per l'índex de fiabilitat requerit .....                                    | 54 |
| Taula 4.5 Vida útil nominal dels diferents tipus d'estructura EHE-08.....                               | 56 |
| Taula 4.6 Classes de conseqüències segons EN 1990 .....   | 61 |
| Taula 4.7 Categories de vida útil segons EN 1990.....   | 62 |

## Glossari

ASD: *Allowable Stress Design*, Disseny de tensió admissible

CDF : *Cumulative Density Function*, Funció de Densitat Acumulada

DES : *Discrete Event Simulation*, Simulació d'Events Discrets

FFT: *Fast Fourier transform*, Transformada Ràpida de Fourier

FOR: *First-Order Reliability*, Fiabilitat de Primer Ordre

FOSM: *First-Order Second-Moment theory*, Primer Ordre, Segon Moment

HDMR: *High Dimensional Model Representation*, Representacions de Models d'Alta Dimensionalitat

LSD: *Limit State Design*, Disseny d'estat límit

LRFD: *Load and Resistance Factor Design*, Factor de Disseny de Càrrega i Resistència

MTTF: *Mean Time To Failure*, Temps mitjà fins la fallada

PDF : *Probability Density Function*, Funció de Densitat de Probabilitat

RAMS: *Reliability, Availability, Maintainability and Safety*. Fiabilitat, Disponibilitat, Manteniment i Seguretat

---

AISC: *American Institute of Steel Construction*

AISI: *American Iron and Steel Institute*

ASCE: *American Society of Civil Engineers*

CIB : *Conseil International du Batiment*

CSA: *Canada Standards Association*

ECCS : *European Convention for Constructional Steelwork*

FIB : *Fédération Internationale de Béton*

IABSE : *International Association for Bridge and Structural Engineering*

IEEE: *Institute of Electrical and Electronics Engineers*. World professional association for the advancement of technology.

JCSS: *Joint Committee on Structural Safety*

NSB: *National Standards Body*, Cos d'estàndards nacionals, (ex: AENOR a Espanya)

RILEM : *Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions*

SJI: *Steel Joist Institute*



## 1. Introducció

L'objectiu d'aquest treball és estudiar el concepte de "fiabilitat estructural" i la seva aplicació al disseny i al càlcul de les estructures d'edificació. Per assolir aquest objectiu s'han revisat tant els coneixements bàsics relacionats amb la fiabilitat com els mètodes de càlcul estructural i les normatives corresponents.

Construir estructures és una activitat econòmica que com qualsevol altra implica l'assumpció de certs **riscos**. Valorar el cost de la fallada d'una estructura implica valorar la vida humana, per tant és un tema crític el poder determinar la inversió raonable que ens permet evitar accidents amb conseqüències no desitjades. Els riscos que han tingut més transcendència en els últims temps són els relatius al món financer: La fallida del grup *Lehman Brothers* és un clar exemple de les greus conseqüències que podem tenir si treballem amb riscos mal controlats.

L'estructura d'aquesta memòria és la següent: En el Capítol 2 es defineixen i descriuen els conceptes bàsics que intervenen en la fiabilitat, com ara la probabilitat de fallada, l'índex de fiabilitat, la funció de fiabilitat, entre d'altres; a continuació es fa una revisió de les incerteses que intervenen en el procés de càlcul d'una estructura d'edificació i es descriuen les diferents maneres d'introduir la seguretat en aquest procés. Després d'aquesta introducció dels conceptes bàsics, en el Capítol 3 es descriuen els mètodes d'anàlisi de fiabilitat estructural agrupats segons el nivell de probabilitat i segons els diferents mètodes aproximats de càlcul.

Qualsevol treball d'anàlisi i de propostes en aquest camp cal que tingui en compte la normativa existent; és per això que al Capítol 4 es fa una anàlisi de la fiabilitat estructural a les normatives, tant les nacionals: el Codi Tècnic de l'Edificació i l'EHE, com de les internacionals, com ara l'Eurocodi i d'altres.

Al Capítol 5, amb un interès més metodològic, s'estudien les aportacions més recents en recerca dins del camp de la fiabilitat estructural, i es fa una breu descripció dels Instituts i grups de recerca que treballen en aquesta línia. En un sentit més aplicat, en el Capítol 6 es presenta el programari de càlcul existent enfocat a la fiabilitat estructural i les aportacions més interessants de cadascun d'ells. El PFC acaba amb un apartat de conclusions i línies d'actuacions futures.

## 2. Conceptes bàsics de Fiabilitat

Una de les definicions més esteses de la fiabilitat és la que podem trobar, per exemple, a *l'enciclopèdia.cat*: “Mesura de la **confiança** que hom pot tenir en el funcionament correcte d'un sistema o d'un dels elements que el componen.”

D'altra banda, la *IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) Reliability Society* la defineix com: “...*the ability of a system or component to perform its required functions under stated conditions for a specified period of time.*”; traduït: “...és la capacitat d'un sistema o component per realitzar les **funcions que li demanem** en les **condicions establertes** durant un **període de temps específic**”. Aquesta definició ens dóna una idea força més precisa del que volem dir quan parlem de fiabilitat:

- Les funcions que demanem, vol dir, allò que exigim al que dissenyem.
- Ens preguntem quines són les condicions en las que treballarà.
- I durant quin període de temps concret.

Un tema important que hem de tenir molt present és que la fiabilitat pot variar amb el temps ja que les condicions inicials que considerem en el seu càlcul també poden variar al llarg del temps, és a dir, la fiabilitat no és una propietat fixa dels elements.

També hem de tenir en compte un altre factor important que trobem en aquesta altra definició: “fiabilitat és la **probabilitat** que quelcom funcioni com esperem que ho faci, o no”. Si abans hem comentat que les condicions poden variar amb el temps, degut a les incerteses de les variables que hi participen en la seva anàlisi, és mitjançant els mètodes de càlcul probabilístic que podrem mesurar i calcular aquesta probabilitat.

Es a dir, la fiabilitat està relacionada amb la **probabilitat** i el **temps**, com podem veure amb exemple senzill: Quan comprem una cadira donem per fet que complirà la funció que li volem donar, o sigui seure'ns. Aquesta funció la farà sota unes condicions normals d'utilització, és a dir que no la farem servir altres usos no contemplats, i també podem comptar que el temps de vida d'aquesta pot ser superior als 10 anys o més, gràcies a l'experiència anterior que ja tenim amb productes similars. Una altra cosa que podem donar per fet és que la fiabilitat d'aquesta cadira anirà disminuint segons passi el temps, degut al seu us.

D'altre banda, si en tenim varies d'aquestes cadires podem pensar que si totes són fabricades amb els mateixos materials i procés de fabricació, lo més probable és que totes tinguin un funcionament durant la seva vida i un envelliment molt similar.

D'altres definicions, encara que poden ser menys explicatives ens afegixen elements que ens aporten una millor comprensió general, com ara: “La fiabilitat és la qualitat de ser fiable, **segura** o de confiança”. La necessitat de seguretat ve de l'existència d'un risc, i a qualsevol acció o element sempre hi ha el risc que no funcioni o treballi com nosaltres

ho esperem. Augmentant la seguretat disminuïm el risc, però mai el podrem fer desaparèixer perquè el risc zero és inviable, degut a la impossibilitat econòmica i pràctica de considerar totes les probabilitats de fallada.

A l'esquema 2.1 podem veure la relació entre els diferents termes involucrats en la fiabilitat: Les incerteses tenen una probabilitat d'ocurrència que condiciona el nivell de risc (a més probabilitat més risc), aquest risc és variable amb el temps, i també està condicionat pel nivell de seguretat desitjat.



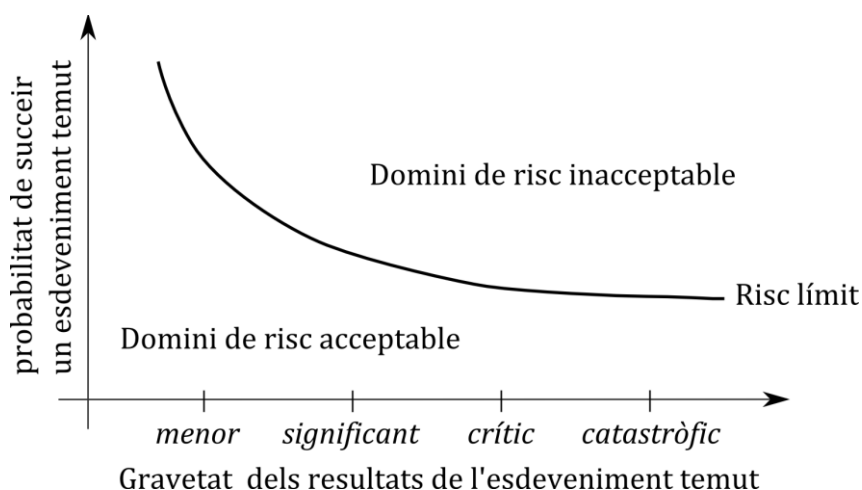
**Figura 2.1 Termes involucrats en la Fiabilitat**

El risc és el mal potencial que pot sorgir per un procés present o esdeveniment futur. Combina la probabilitat que succeeixi un esdeveniment negatiu ponderat amb la gravetat dels danys resultants: Segons ens explica *Lemaire (2009)*, el risc és l'existència d'un temor degut a un esdeveniment que té una probabilitat, o possibilitat, de succeir, a més a més de la gravetat de les conseqüències si aquest succeeix.

L'equació que relaciona el risc amb la probabilitat és:

$$\text{Risc} = \text{Gravetat} \times \text{Probabilitat}$$

És a dir, el Risc depèn del binomi gravetat i probabilitat, la relació entre aquests dos el podem veure al següent gràfic on, per exemple, ens adonem que si augmenta la gravetat d'un succés s'ha de reduir la probabilitat de que aquest succeeixi per tal que aquest continuï estant dintre d'un domini de risc acceptable (figura 2.2):



**Figura 2.2 Relació probabilitat - gravetat**

La forma que tenim d'afrontar els riscos és a base d'experiència. Aquesta ens ajuda, gràcies al sistema de prova i error, a limitar aquestos al mínim nivell possible. Però no

sempre podem disposar d'aquesta experiència ja que qualsevol avanç, com ara el tecnològic, és impossible sense innovació i aquesta fa que haguem d'endinsar-nos en terrenys nous i desconeguts que porten associats riscos nous i desconeguts.

A l'hora d'haver de resoldre qualsevol problema ens trobem que no sempre podem tenir en compte totes les condicions i variables inicials, amb el que se'ns generarà una **incertesa**. Les incerteses són degudes a que sempre hi ha diferències entre els coneixements i la realitat física. A mes a mes sabem que les perturbacions petites d'un estat inicial poden donar lloc potencialment a grans diferències en les conseqüències. Aquest fenomen d'inestabilitat el podem veure a la meteorologia o la mecànica estructural, (*Lemaire, 2009*). L'objectiu de la teoria de la fiabilitat és estar segurs que el domini de la incertesa és el suficient per tal de poder avaluar correctament els riscos i que aquests estiguin dins d'uns paràmetres acceptables (*Ditlevsen, 2005*).

Per poder analitzar els riscos també haurem de tenir present la imprevisibilitat i, potser, la impossibilitat de decidir. D'altra banda, els accidents seriosos i una intolerància als danys d'una part de la població ha conduït a una deliberació política de l'evolució de l'enfocament determinista gràcies a la integració del concepte probabilista a l'anàlisi del risc (*Lemaire, 2009*).

Existeixen diferents riscos segons el camp d'estudi, així doncs podem parlar per exemple de Risc Laboral (accidents de treball), Risc financer (de crèdit), Risc Biològic (infeccions, epidèmies, ...) o Risc Geològic (terratrèmols, volcans, esclavissades, ...).

Dels riscos d'accident més habituals, amb resultat de mort per a les persones, podem veure a la següent taula la **el número de morts aproximat per cada hora d'exposició a diferents activitats habituals**:

| Activitat                      | Taxa de morts aprox.<br>$\times 10^{-9}$ morts/h exp. | Exposició<br>típica | Risc de<br>mort típic |
|--------------------------------|---|---------------------|-----------------------|
| Alpinisme                      | 30000 - 40000   | 50                  | 1500 - 2000           |
| Natació                        | 3500  | 50                  | 170                   |
| Viatge aeri                    | 1200  | 20                  | 24                    |
| Viatge en cotxe                | 700   | 300                 | 200                   |
| Viatge en tren                 | 80  | 200                 | 15                    |
| Accident durant la construcció | 70 - 200  | 2200                | 150 - 440             |
| Col·lapse d'un edifici         | 0.02  | 6000                | 0.1                   |

**Taula 2.1 Riscs de mort d'activitats habituals (Melchers, 1999)**

Amb aquesta taula (2.1) podem veure que el risc de mort degut al col·lapse de l'estructura d'un edifici és molt baix comparat amb altres activitats diàries habituals. El temps d'exposició és el més gran, ja que normalment si no hi som a casa hi som en un altre edifici treballant o comprant, per exemple.

La diferència entre risc i amenaça, des d'un punt de vista probabilístic, és que una amenaça no la considerarem com a un risc si no hi ha hagut almenys un incident on l'amenaça s'hagi concretat. En termes particulars, una amenaça és tot allò que tingui una possibilitat o probabilitat d'ocórrer, com a causant de dany. En aquest cas podem veure el risc com el producte de l'ocurrència d'aquesta amenaça per la seva conseqüència. Per exemple, a l'atac de les torres bessones de Nova York la CIA coneixia l'existència del perill que fossin usats avions com armes terroristes, però resulta que això es considerava només com una amenaça i no com un risc, perquè l'amenaça no s'havia concretat cap vegada abans.

Sense l'ocurrència d'amenaçes el risc seria zero, però fins i tot en una indústria com l'aeroespacial, que treballa sempre amb uns alts graus de seguretat, Gabrielle Giffords (Congresswoman, space subcommittee of the House Science and Technology Committee, 2009) feia aquest comentari revelador: "El vehicle de llançament més segur és aquell que no vola mai". Aquesta idea l'hem de tenir sempre present: eliminar els riscos és gairebé impossible per lo que la seva avaluació i valoració és molt important.

En relació a la indústria aeroespacial, és fàcil suposar la constant necessitat de treballar amb la innovació i això dona peu a haver de tenir present moltes incerteses. El fet és que en poc més de 40 anys de cursa aeroespacial hagin mort 22 astronautes d'un total de 439 que han viatjat a l'espai (dades de Nov. 2004). És a dir, un 5% dels astronautes han mort en missions espacials a tot el món. Podem veure que és un percentatge prou alt com per existir un gran interès per l'estudi de les incerteses que envolten aquests camps de recerca i enginyeria .



**Figura 2.3 Fotografia de la explosió del Transbordador espacial Challenger (NASA, 1986)**

A l'antiguitat ja hi havia una percepció del risc. El codi del rei Hammurabi de Babilònia va ser el primer en establir unes normes de construcció on es tenia en compte el concepte de risc a la construcció, i que a més és el primer codi legal relatiu a la construcció de cases que es coneix (*Lemire, 2009*). Aquest codi data de l'any 1755 aC. i

va ser utilitzat a Mesopotàmia durant un miler d'anys. No es pot considerar com un codi amb una gran base científica ja que les prescripcions estaven "dictades pels deus", motiu pel qual, aquestes lleis eren sagrades. El codi d'Hammurabi diu per exemple que si un arquitecte construeix una casa que s'enfonsa a sobre dels seus ocupants i els produeix la mort aleshores aquest serà condemnat a la pena de mort. De la mateixa manera si el que mor és el fill del propietari aleshores serà el fill del constructor el condemnat a mort. Mitjançant aquesta justícia retributiva, que bàsicament era la llei del Talió, en el fons era una forma de vincular el risc: del propietari al constructor (*Rivero, 2009*).

Al Renaixement no va canviar gaire aquest sistema. Quan es feia el projecte d'un pont, Per exemple, en el moment de signar el contracte a vegades s'afegia una clàusula on s'indicava que en cas de fallada del pont s'emparedaria la dona de l'enginyer, fet que feia entreveure la percepció determinista de la seguretat tant del client com també de l'enginyer.

No va ser fins el 1828 que Claude-Louis Navier, enginyer i físic francès, va explicar en la seva defensa per la fallada del pont que construïen sobre el riu Sena: "L'enginyer procura donar la resistència necessària a una obra però no és infalible [...] El cost de la reparació del seu error serà sempre inferior al cost d'un excés de resistència superflu a tota l'obra."

Anys després, al 1926, l'enginyer alemany Max Meyer afegia la següent idea al seu llibre "La seguretat en les construccions i el seu càlcul aplicant els esforços límit en lloc de les tensions admissibles": "El fet de proclamar que qualsevol gènere de planificació s'ha de basar en consideracions de probabilitats constitueix una concepció simple i molt prometedora pel que fa a la clarificació del problema. Es tracta d'una concepció que s'acabarà imposant".

La fiabilitat té una gran importància en la indústria: La reputació d'una empresa està molt lligada amb la fiabilitat dels productes que fabrica, ja que el client ho percep com una mesura de qualitat. Aquesta fiabilitat pot repercutir també econòmicament en els costos de reparació o canvi dels productes que fallen durant el període de garantia. Això també afecta a la satisfacció del client i que aquest continuï confiant en els productes de l'empresa. També té aplicació en el disseny i producció de productes: A l'hora de vendre un producte si fem una anàlisi dels costos podem arribar a la conclusió de que un producte pot tenir un preu major al de la competència però si la seva vida útil és superior el seu cost final potser és inferior ja que requereix de menys manteniment o reparacions. És així com ens adonem del lligam existent entre la fiabilitat i la qualitat. El control de qualitat no té una continuïtat en el temps ja que una vegada s'ha fet aquest no podem assegurar amb garanties que el producte o material conservi aquestes característiques durant un període determinat. Però gràcies a que disposem d'eines com l'anàlisi de la fiabilitat podem fer estudis i estimacions.

En fiabilitat el temps pot ser en termes de "cicles de funcionament", "nº de hores", "duració del procés", etc. Ens podem trobar exemples en camps com la medicina: supervivència d'un pacient a un tractament o enginyeria: duració d'un component. S'estudia mitjançant l'anàlisi de dades de supervivència, mitjançant les funcions de fiabilitat o supervivència, funció de risc, funció de densitat i funció de distribució.

La funció de supervivència, o de fiabilitat, ens dona la probabilitat que un component estigui funcionant després de un n<sup>o</sup> "t" d'hores, i és el complement a 1 de la funció de distribució del temps de fallada. Aquesta funció de supervivència té la següent propietat: per un temps inicial 0 el valor és igual a 1 i per un temps infinit és igual a 0:

$$S(0) = 1;$$

$$S(\infty) = 0$$

A més a més tenim la funció de risc (*hazard function* en anàlisi de processos) que ens dona una mesura de la probabilitat de fallada immediata, donat que el component està funcionant. Aquestes funcions poden ser constants, creixents o decreixents, segons cada cas. Un exemple és la funció en corba de banyera: Quan un element respon a aquesta corba vol dir que al començament té una part de mortalitat alta, després una taxa de fallada constant, i després augmenta el risc segons passa el temps.

## 2.1. Exemple de fiabilitat

Per entendre millor el concepte de fiabilitat i veure com afecta el nombre d'elements que componen un sistema així com la seva relació o dependència entre ells exposem el càlcul de fiabilitat de tres casos senzills: una moto, un cotxe i un furgó. La probabilitat de fallada d'una roda i de com aquesta fiabilitat està condicionada segons la relació amb la resta de rodes del vehicle. Per aquests exemples considerarem que el temps de fallada d'una roda segueix una distribució normal amb 60.000km de mitjana, i una desviació tipus de 8.000km.

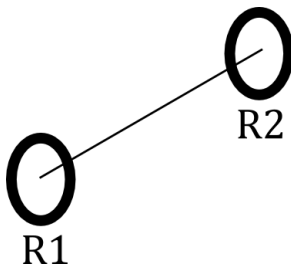
Quina és la probabilitat de funcionament de cadascú dels sistemes després dels 65.000 km?

Tenim  $T \sim N(\mu, \sigma^2)$  amb  $\mu=60.000$  i  $\sigma=8.000$ . La supervivència o fiabilitat d'una roda per  $t_0=65.000$  és:

$$P[T > 65000] = P\left[Z > \frac{65000 - 60000}{8000}\right] = P[Z > 0,625] = 1 - P[Z \leq 0,625] = 0.2643$$

Es a dir, que tenim un 26.43% de probabilitat que una roda funcioni bé després dels 65.000km.

- a) Motocicleta, amb dues rodes. La condició de fiabilitat és que si una de les dues rodes falla el sistema fallarà:



És un sistema en sèrie, ja que la fallada de qualsevol dels seus components origina la fallada del sistema:

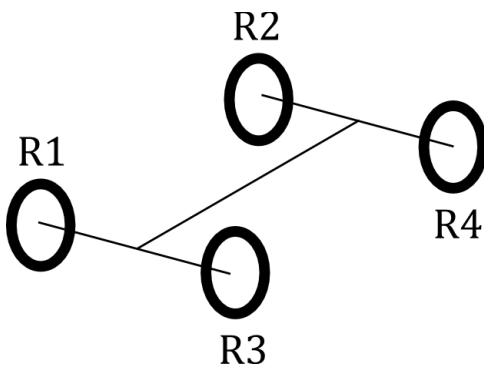


La supervivència o fiabilitat del sistema suposant la independència entre les rodes, per  $t_0=65000$  és:

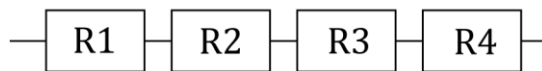
$$S_{\text{moto}}(t_0) = S_{R1}(t_0) \cdot S_{R2}(t_0) = 0.2643^2 = 0.06985 \text{ (6.99\%)}$$

Es a dir, tenim gairebé un 7% de probabilitat de poder fent servir la moto després dels 65.000 km sense problemes.

- b) Cotxe, amb quatre rodes. La condició de fiabilitat és que si una de les quatre rodes falla el sistema fallarà:



És un sistema en sèrie, ja que la fallada de qualsevol dels seus components origina la fallada del sistema:



La supervivència o fiabilitat del sistema, suposant la independència entre les rodes, per  $t_0=65000$  és:

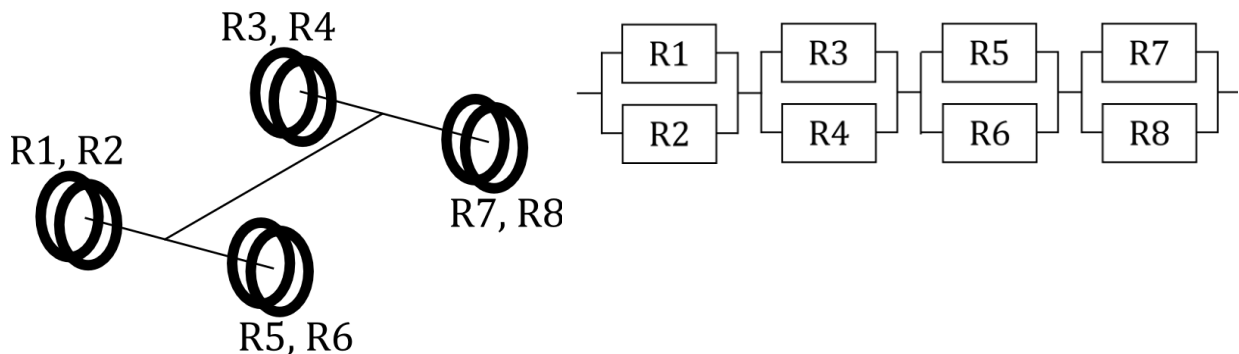
$$S_{\text{cotxe}}(t_0) = S_{R1}(t_0) \cdot S_{R2}(t_0) \cdot S_{R3}(t_0) \cdot S_{R4}(t_0)$$

$$S_{\text{cotxe}}(t_0) = 0.2643^4 = 0.0049 \text{ (0.49\%)}$$

En aquest cas podem veure com baixa la supervivència del conjunt pel fet de que els seus membres tenen una relació en sèrie.



- c) Furgó blindat amb quatre rodes dobles: vuit rodes en total. La condició de fiabilitat és que el sistema falla quan fallen dues rodes que estiguin juntes:



És un sistema paral·lel – sèrie, format per 4 subsistemes paral·lel en sèrie.

Per calcular la supervivència, o fiabilitat, del sistema per  $t_0=65000$  primer calcularem la fiabilitat d'un dels subsistemes, com el format pel grup R1 i R2, que anomenarem G1:

$$S_{G1}(t_0) = 1 - F_{G1}(t_0) = 1 - F_{R1}(t_0) \cdot F_{R2}(t_0)$$

$$S_{G1}(65000) = 1 - (1 - 0.2643)^2 = 0.4587$$

$$S_{\text{furgó}}(65000) = 0.4587^4 = 0.0443 \text{ (4.43\%)}$$

En el cas del furgó, la doble roda és un sistema redundant que augmenta la supervivència del conjunt, com podem veure si la comparem amb la del cotxe.

Lo que podem deduir d'aquests exemples és que un sistema on els seus components estan en sèrie és menys fiable segons augmentem el nº de components i que els sistemes amb components en paral·lel tenen més fiabilitat gràcies al components redundants.

Per exemple, la moto amb rodes dobles tindria una  $S_{\text{moto}}(t_0)=0,2104$  (21,04%)

## 2.2. Fiabilitat estructural

La fiabilitat estructural és una branca de l'enginyeria que desenvolupa els mètodes conceptes i eines per poder determinar la fiabilitat i seguretat de les estructures de les construccions. Actualment es fa servir principalment a la obra civil: ponts de carreteres, plataformes marines, etc.

La fiabilitat estructural es pot definir com la probabilitat que una estructura no arribi a un dels estats límits, de servei o col·lapse, durant un període de temps determinat (*Thoft-Christensen, 1986*). En termes quantitius, la fiabilitat es pot definir com el concepte complementari a la probabilitat de fallada.

Els conceptes bàsics sobre fiabilitat estructural estan indicats en les normatives nacionals, en el Document Europeu EN 1990 i en la Norma Internacional ISO 2394.

A la norma ISO 2394 trobem aquesta altra definició: fiabilitat és la capacitat de l'estructura per complir amb uns requisits determinats durant el temps d'utilització (vida útil) per al qual va ser calculada i sota unes condicions específiques.

Tal com hem comentat abans quan parlaven de la fiabilitat en general, en aquest cas també és una funció dependent del temps ja que els materials que fem servir en les construccions tenen una vida útil delimitada per la exposició als agents mediambientals temperatura, canvis químics, fatiga, sobrecàrregues, etc.

A la norma EN 1990 ens indiquen que les estructures han de ser calculades i construïdes amb la major fiabilitat (durant el temps que s'estimi que ha d'estar operativa) i el menor cost.

La fiabilitat depèn directament dels següents factors:

- Resistència estructural
- Servei
- Durabilitat

I sempre en relació amb:

- Vida útil estimada de l'estructura. (50 anys a l'edificació, normalment)
- Situació particular que s'ha tingut en compte pel càlcul (Accions i càrregues)
- Estats límits (últims i de servei)

El terme "fiabilitat" s'utilitza sovint com un valor absolut: una estructura és fiable o no ho és. El problema és que segons això, en cas que determinem que una estructura és fiable podem transmetre la idea que una fallada d'aquesta estructura no pot succeir mai. És per això que no podem fer aquesta simplificació perquè, encara que sigui difícil d'entendre a algunes persones, la fiabilitat absoluta no existeix. Per aquest motiu és sempre molt important tenir present en el càlcul la probabilitat que pugui haver-hi una fallada durant el temps de vida útil de l'estructura (*Holický, Vrouwenvelder, 1990*).

L'estudi de la fiabilitat estructural té interès en el càlcul i predicció de la probabilitat que se superi un estat límit durant la vida útil d'una estructura i es preocupa en particular per l'estat límit últim. Per l'experiència podem dir que molt poques estructures col·lapsen o pateixen danys importants pel que la violació de l'estat límit últim és un fet que ens el trobarem molt rarament. La probabilitat que passi és un valor que podem obtenir de mesures de freqüències d'ocurrència a llarg termini de l'esdeveniment en estructures similars o pot ser simplement una estimació numèrica del seu valor. A la pràctica rarament és possible observar-ho durant un període de temps suficientment llarg pel que una combinació d'unes estimacions subjectives i observacions de freqüència per als components i propietats estructurals es poden utilitzar per predir la violació de l'estat límit últim de l'estructura (*Melchers, 1999*).

A l'edat mitjana va tenir lloc el primers anàlisi de les incerteses amb la construcció de les catedrals pel mètode "prova i error" gràcies als fracassos coneguts. Un dels primers en veure una relació entre l'efecte de la càrrega i la resistència de les bigues va ser

Leonardo da Vinci. Poc després Galileo va iniciar el primer model de disseny per l'optimització de la resistència d'una biga en voladís.

Abans del segle XIX les estructures no es calculaven, es construïa en base a la intuïció, la imitació i l'experiència acumulada.

Les primeres idees de fiabilitat estructural són degudes al professor i investigador nord-americà Alfred M. Freudenthal a l'any 1947. A Espanya Alfredo Páez i Eduardo Torroja van fer les primeres aportacions de càlcul probabilístic en la seguretat de les estructures de formigó (*Escola, 1988*).

Actualment hi ha un gran coneixement en la simulació del comportament dels materials i les construccions el que ens porta a pensar que en el futur podrem tenir una perfecció en els models i solucions tal que els enginyers podran confiar plenament en aquestes, encara que sempre haurem de viure tenint present l'atzar.

A mode de resum, el principal objectiu d'una anàlisi de fiabilitat estructural és determinar la probabilitat de fallada del sistema estructural.

### 2.2.1. Probabilitat de fallada

Una estructura falla en el moment en que l'efecte de la càrrega aplicada excedeix la capacitat de resposta de l'estructura. L'anàlisi probabilista té com a objectiu trobar la probabilitat que una estructura es trobi dintre de les condicions de fallada, és a dir, la probabilitat de fallada.

Generalment entendrem la probabilitat de fallada, o  $P_f$ , com la probabilitat que la resposta de l'estructura  $R$  sigui inferior als efectes de les accions  $S$ :

$$P_f = P(R < S)$$

Per tal de poder definir  $P_f$  partirem de la hipòtesi que podem descriure el comportament d'una estructura mitjançant un conjunt de variables bàsiques:

$$X = [X_1, X_2, \dots, X_n]$$

que representen les accions, les propietats mecàniques, les dades geomètriques i els models d'incertesa.

A més, suposem que l'estat límit d'una estructura (ja sigui estat límit últim, de servei, de durabilitat o de fatiga) queda definit per la funció d'estat límit (funció de prestacions), habitualment definida en forma implícita com:

$$Z(X) = 0.$$

Aquesta funció d'estat límit  $Z(X)$  s'ha de definir:

$Z(X) \geq 0$  per a un estat favorable (secur) de l'estructura.

$Z(X) \leq 0$ , per a un estat desfavorable (fallada).

Per a la majoria dels estats límit la probabilitat de fallada la podem expressar com:

$$P_f = P\{Z(X) < 0\}$$

La probabilitat de fallada  $P_f$  es pot avaluar en termes precisos si es descriuen les variables bàsiques  $X = [X_1, X_2, \dots, X_n]$  mitjançant models probabilístics adequats (numèrics o analítics).

Prenent la hipòtesi que aquestes variables bàsiques es poden descriure mitjançant una funció de densitat de probabilitat conjunta independent del temps  $\varphi_X(x)$ , llavors la probabilitat de fallada  $P_f$  es pot calcular mitjançant la integral:

$$P_f = \int_{Z(X) < 0} \varphi_X(x) dx$$

Quan alguna de les variables bàsiques sigui funció del temps, en principi es requerirà utilitzar procediments una mica més elaborats. No obstant això, en molts d'aquests casos és possible transformar el problema en qüestió en un altre independent del temps, per exemple en considerar en les equacions anteriors tan sols el valor mínim per a la funció  $Z(X)$  dins del període de referència  $T$ , (*Holický, Vrouwenvelder, 1990*).

### 2.2.2. Índex de Fiabilitat, $\beta$

L'Índex de Fiabilitat, que representem amb  $\beta$ , és un terme equivalent a la probabilitat de fallada o el risc. Es defineix com l'oposat de la variable normal tipificada corresponent a la probabilitat de fallada  $P_f$ :

$$\beta = -\phi^{-1}(P_f)$$

On  $\phi^{-1}$  és la funció inversa de la funció de distribució d'una variable aleatòria normal tipificada.

Aquesta definició de l'índex de fiabilitat és una mesura de fiabilitat estructural que es fa servir molt sovint en la documentació internacional, com ara el Eurocodi EN 1990 o la norma ISO 2394.

A mes a mes amb aquesta equació podem veure la correspondència que existeix entre la probabilitat de fallada i l'índex de fiabilitat, ja que representen mesures de fiabilitat totalment equivalents. Podem veure l'equivalència d'alguns valors a la següent taula:

|         |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $P_f$   | $10^{-1}$ | $10^{-2}$ | $10^{-3}$ | $10^{-4}$ | $10^{-5}$ | $10^{-6}$ | $10^{-7}$ | $10^{-8}$ | $10^{-9}$ |
| $\beta$ | 1,28      | 2,33      | 3,09      | 3,71      | 4,26      | 4,75      | 5,19      | 5,62      | 5,99      |

Taula 2.2 Relació entre probabilitat de fallada  $P_f$  i l'índex de fiabilitat  $\beta$

Tant en la norma EN 1990 com en ISO 2394, la recomanació bàsica sobre el nivell de fiabilitat requerit sovint es formula utilitzant l'índex de fiabilitat  $\beta$  juntament amb el valor corresponent a la vida útil de l'estructura, (*Holický, Vrouwenvelder, 1990*), com es

pot veure a la taula 2.3 (EN 1990). Els valors d'aquesta taula són convencions, no valors absoluts, és a dir que per exemple el valor de  $\beta = 3.8$  correspon a la vida útil per a edificis residencials i d'oficines.

| Conseqüències per la pèrdua de vides humanes, econòmiques, socials i mediambientals | Índex de fiabilitat $\beta$ |                               |
|---|-----------------------------|-------------------------------|
|   | $\beta_a$ for $T_a = 1$ any | $\beta_b$ for $T_b = 50$ anys |
| Altes   | 5.2                         | 4.3                           |
| Mitjanes  | 4.7                         | 3.8                           |
| Baixes  | 4.2                         | 3.3                           |

**Taula 2.3 Classificació de l'índex de fiabilitat**

Per mesurar la seguretat estructural, el concepte d'índex de fiabilitat és, amb molt, més explícit que el factor de seguretat habitual. L'índex de fiabilitat probabilístic incorpora la incertesa de les càrregues i les resistències de l'element en un model comprensiu, mentre que el factor de seguretat determinista és normalment la divisió de les dues. El resultat,  $\beta$ , proporciona a l'enginyer una probabilitat de fallada independentment dels criteris de disseny. El mètode probabilístic és especialment útil per determinar la fiabilitat sota condicions de sobrecàrrega, també proporciona una transició entre la mentalitat de càlcul de la tensió admissible de Disseny (ASD: *Allowable Stress Design*) i el procés de disseny amb factors de càrrega i de resistència (LRFD: *Load and Resistance Factor Design*), (Wilshusen, 1995). Amb el sistema de disseny ASD el dissenyador s'assegura que els esforços desenvolupats en l'estructura a causa de les càrregues de servei no excedeixi el límit elàstic, en canvi amb el LRFD el que tindrà en compte és que no es superi cap estat límit quan l'estructura està sotmesa a totes les combinacions possibles de les diferents càrregues de disseny.

Segons si els factors de seguretat tenen una distribució normal o bé la tenen log-normal farem servir una de les següents fórmules indicades a continuació:

Si s'assumeix que la distribució dels Factors de Seguretat, després d'un anàlisi probabilístic, té una distribució normal, (figura 2.4), llavors l'equació a utilitzar per calcular l'Índex de Fiabilitat és:

$$\beta = \frac{\mu - 1}{\sigma}$$

On:

$\beta$  = Índex de Fiabilitat

$\mu$  = Mitjana del Factor de Seguretat

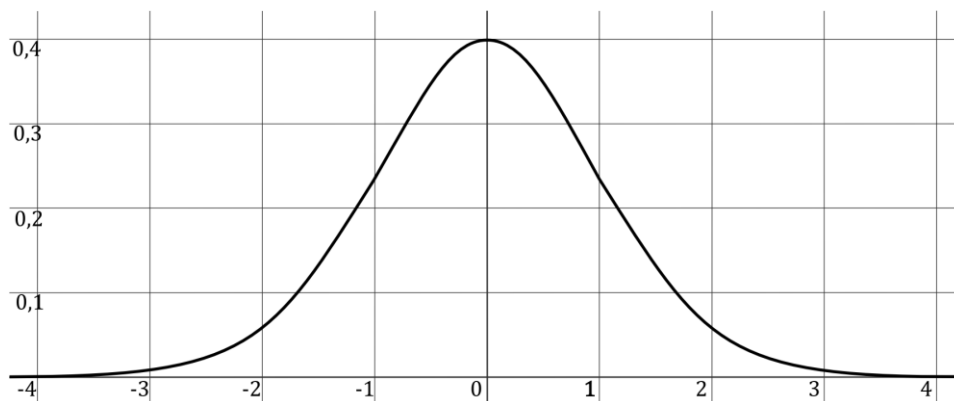
$\sigma$  = Desviació estàndard del Factor de Seguretat

En aquest cas l'índex de fiabilitat representa el nombre de desviacions estàndard que separen el Factor de Seguretat mitjà del Factor de Seguretat crític (= 1)

Com a regla general l'índex de fiabilitat ha de ser almenys igual a 3 o més per tenir garanties raonables d'un disseny segur, encara que l'índex òptim depèn de cada camp d'estudi on el fem servir.

Un índex de fiabilitat igual a 0 implica que el factor de seguretat mitjà és igual a 1.

Un índex de fiabilitat negatiu indica un Factor de Seguretat mitjà menor que 1.



**Figura 2.4 Distribució Normal N(0,1)**

Entre -1 i 1 trobem el 68% . de -2 a 2 el 95% i de -3 a 3 el 99%

La corba de Gauss o Normal es fa servir sovint pels casos amb coeficients de variació petits, com ara el mòdul de Young, el coeficient de Poisson (la constant elàstica) i d'altres propietats dels materials (Choi, 2006).

Si s'assumeix que la distribució dels Factors de Seguretat, després d'un anàlisi probabilístic, té una distribució log-normal, (figura 2.5), llavors l'equació a utilitzar per calcular l'Índex de Fiabilitat és:

$$\beta_{LN} = \frac{\ln \left[ \frac{\mu}{\sqrt{1 + V^2}} \right]}{\sqrt{\ln(1 + V^2)}}$$

On:

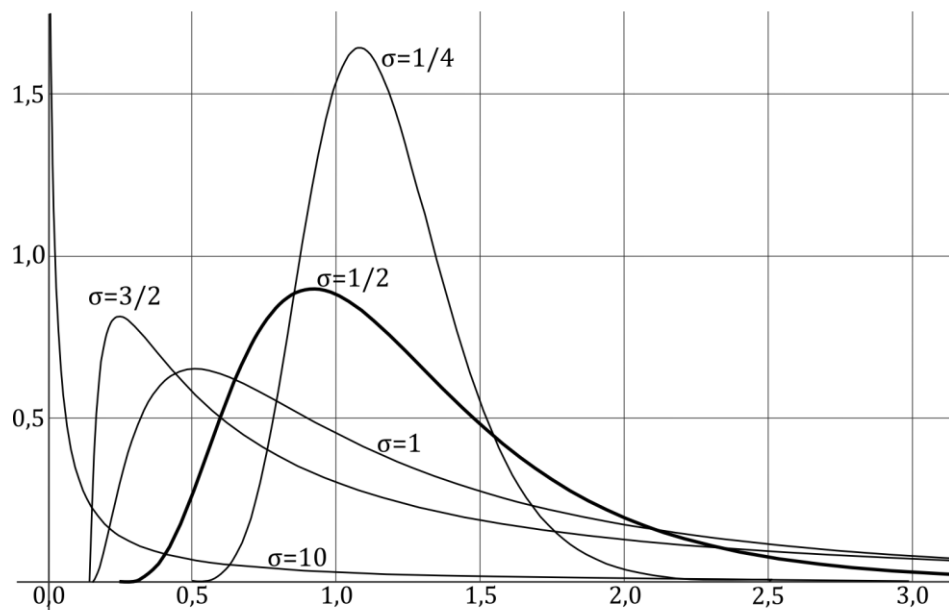
$\beta_{LN}$  = Índex de Fiabilitat

$\mu$  = Mitjana del Factor de Seguretat

$\sigma$  = Desviació estàndard del Factor de Seguretat

$V$  = Coeficient de variació del Factor de Seguretat =  $\sigma / \mu$

Aquesta fórmula (lognormal) es fa servir més sovint per a calcular l'Índex de Fiabilitat que la primera ja que el Factor de Seguretat és sovint més semblant a una distribució Lognormal que no pas a una Normal.



**Figura 2.5** Varies distribucions Log-Normal

A la figura 2.5 podem veure com són de diferents les distribucions log-normal segons els diferents valors que assignem a  $\sigma$ .

### 2.2.3. Índex de Rjanitzzyne-Cornell, $\beta_c$

La primera definició de l'índex de fiabilitat fou proposada pel rus A. R. Rjanitzzyne al 1950 però no va ser fins el 1970 quan va ser popularitzada pel Dr. C. Allin Cornell:

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z}$$

L'índex de fiabilitat  $\beta$  és el coeficient entre la mitjana  $\mu_z$  i la desviació tipus  $\sigma_z$ . Si la mitjana  $\mu_z$  augmenta o la desviació tipus  $\sigma_z$  disminueix la integral de la part negativa de  $z$  disminueix, i la probabilitat de fallada  $P_f$  també disminueix:

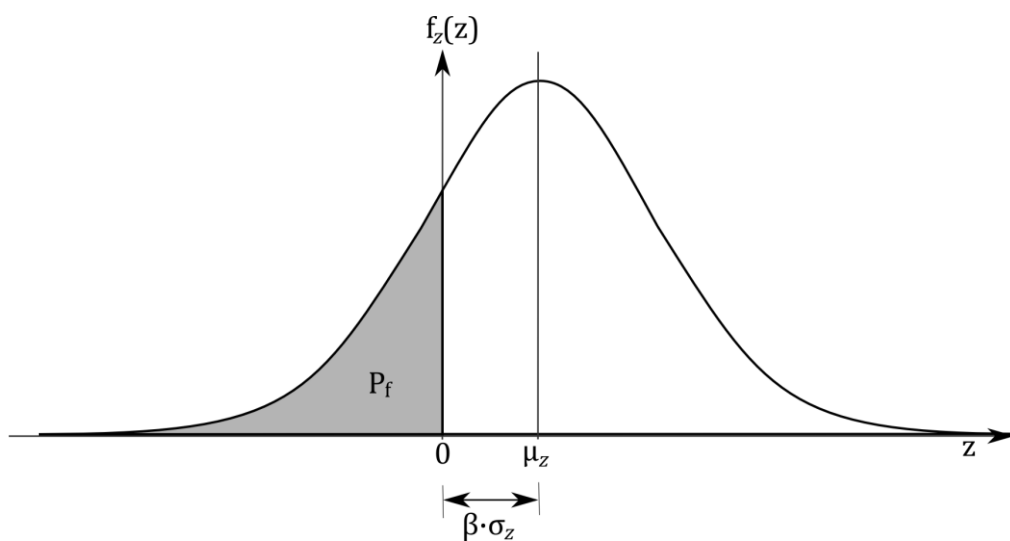


Figura 2.6 Índex de Rjanitzzyne-Cornell

L'índex de fiabilitat de Cornell, indicat en alguns llocs com  $\beta_c$ , representa el número de desviacions típiques  $\sigma_z$  que separen el valor mig de l'origen (figura 2.6), proporcionant una mesura de la fiabilitat del sistema.

Com hem vist a 1.2.2 aquí també estem calculant  $\beta = -\phi^{-1}(P_f)$ .

A continuació explicarem amb un exemple el càlcul de l'índex de fiabilitat  $\beta_c$  d'una biga birecolzada amb una càrrega puntual i una altra uniformement repartida.



### 2.2.4. Exemple de càlcul de l'Índex de Fiabilitat $\beta_c$

Considerem la biga simplement recolzada de la figura 2.7. La biga està sotmesa a una càrrega morta uniformement distribuïda  $q$ .

- Suposem que  $q$  i el límit elàstic del material  $f_y$  són quantitats aleatòries (variables aleatòries).
- La longitud  $L$  i el mòdul resistent de secció plàstic  $W_{pl,y}$  s'assumeix que són valors que es coneixen amb precisió (determinista).

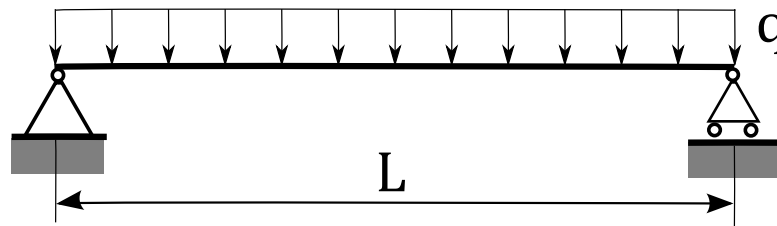


Figura 2.7 Esquema de la biga

La longitud  $L$  és 4,5m

El mòdul plàstic  $W_{pl,y}$  de la secció és  $60.73 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$  ( $6.07 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$ ) [IPE-120]

Els paràmetres de les distribucions per  $q$ , i  $f_y$  s'indiquen a continuació:

Valors de disseny (valor nominal, mitjana i variància de cada variable aleatòria):

Càrrega repartida  $q = 4.2 \text{ kN/m}$

$\mu_w = 4.2 \text{ kN/m}$

$\sigma_w = 0.42 \text{ kN/m}$

Límit elàstic  $f_y = 275 \text{ N/mm}^2$  ( $275000 \text{ kN/m}^2$ )

$\mu_F = 310000 \text{ kN/m}^2$

$\sigma_F = 35400 \text{ kN/m}^2$

Calculem  $\beta$ :

La funció d'estat límit per la flexió de la biga es pot expressar:

$$g(q, f_y) = f_y \cdot W_{pl,y} - \frac{q \cdot L^2}{8}$$

Es a dir, el moment resistent menys el moment produït per la càrrega repartida.

Substituint  $L$  i  $W_{pl,y}$  (i unificant les unitats a N i m), la funció de l'estat límit es pot reescriure com:

$$g(q, f_y) = 6.07 \cdot 10^{-5} \cdot f_y - 22.05 \cdot 10^5 \cdot q$$

Atès que la funció d'estat límit és lineal, i les variables aleatòries són no-correlacionades, aleshores:

$$\beta = \frac{a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cdot \mu_{X_i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i \cdot \sigma_{X_i})^2}} = \frac{6.07 \cdot 10^{-5} \cdot 310 \cdot 10^6 - 22.05 \cdot 10^5 \cdot 4200}{\sqrt{(6.07 \cdot 10^{-5} \cdot 3.54 \cdot 10^7)^2 + (-22.05 \cdot 10^5 \cdot 420)^2}}$$

$$\beta = \frac{8064.35}{2398.48} = 3.3622$$

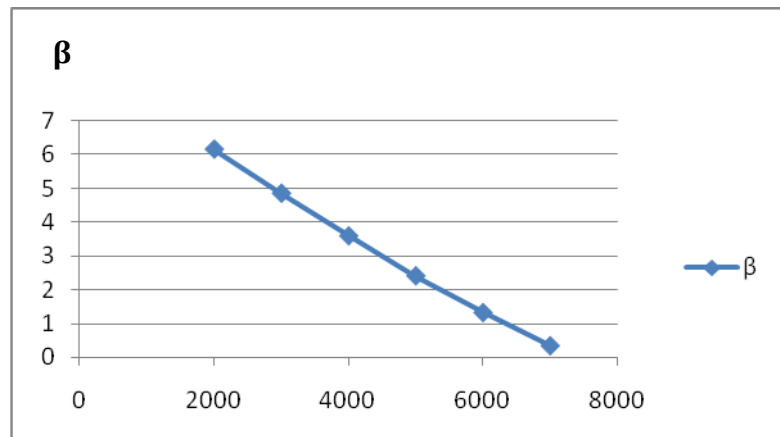
Si ens fixem en la taula 2.4 aquest índex de fiabilitat és equivalent a una probabilitat de fallada  $P_f$  de entre  $10^{-3}$  a  $10^{-4}$ .

|         |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $P_f$   | $10^{-1}$ | $10^{-2}$ | $10^{-3}$ | $10^{-4}$ | $10^{-5}$ | $10^{-6}$ | $10^{-7}$ | $10^{-8}$ | $10^{-9}$ |
| $\beta$ | 1,28      | 2,33      | 3,09      | 3,71      | 4,26      | 4,75      | 5,19      | 5,62      | 5,99      |

Taula 2.4 Relació entre la probabilitat de fallada  $P_f$  i l'índex de fiabilitat  $\beta$

Si fem una taula amb valors diferents de la càrrega  $q$  podem veure com hi ha una relació lineal amb els valors de l'índex de fiabilitat  $\beta$ :

| $q$  | $\beta$ |
|------|---------|
| 2000 | 6.172   |
| 3000 | 4.868   |
| 4000 | 3.606   |
| 5000 | 2.421   |
| 6000 | 1.332   |
| 7000 | 0.351   |



El mateix resultat obtindrem si augmentem la càrrega puntual  $P$  o al longitud de la biga  $L$ . És a dir, si augmentem les accions o disminuïm la resistència la fiabilitat de l'estructura també disminueix.

### 2.2.5. Índex de Hasofer i Lind

L'índex Hasofer i Lind va ser desenvolupat al 1974 i és un índex de fiabilitat que afegeix algunes millores als anteriors, com ara una solució al problema de la invariància (L'índex de fiabilitat de Cornell no varia amb la substitució d'una funció d'estat límit amb una equivalent). Aquest índex avalua la funció d'estat límit en un punt conegut com el punt de disseny, en lloc dels valors mitjans. El punt de disseny no és conegut a priori, i s'haurà de fer servir generalment una tècnica de iteració per trobar-lo.

Considerem una funció d'estat límit  $g(X_1, X_2, \dots, X_n)$  on totes les variables aleatòries  $X_i$  són no correlacionades. La funció d'estat límit es reescriu en termes de la forma estàndard de les variables, que també s'anomenen variables reduïdes:

$$Z_i = \frac{X_i - \mu_{X_i}}{\sigma_{X_i}}$$

L'índex es defineix com la distància més curta des de l'origen de l'espai de variables reduïdes fins a la funció de l'estat límit  $g = 0$  (figura 2.8), que és invariant en les representacions diferents d'un estat límit únic. És necessària una iteració per trobar el punt de disseny  $\{Z_1^*, Z_2^*, \dots, Z_n^*\}$  a l'espai de variables reduïdes de tal manera que  $\beta$  correspongui encara a la distància més curta:

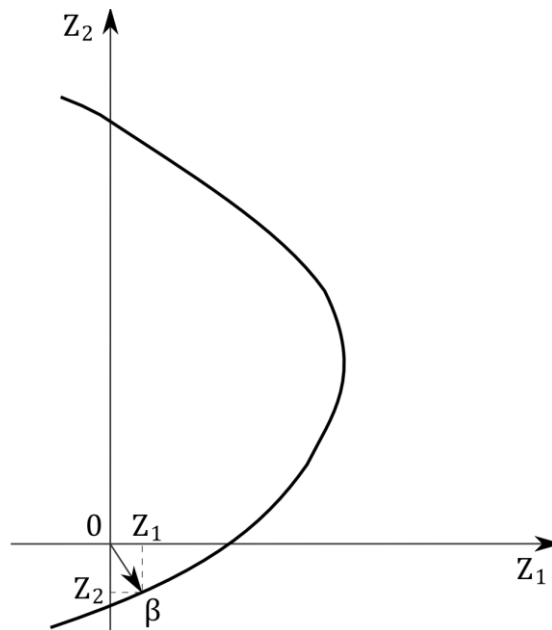


Figura 2.8 Índex de Hasofer i Lind

Per a les variables bàsiques de resistència i sol·licitació,  $R$  i  $S$ , les variables reduïdes es poden expressar:

$$Z_R = \frac{R - \mu_R}{\sigma_R} \quad Z_S = \frac{S - \mu_S}{\sigma_S}$$

Amb el que tenim:

$$R = \mu_R + Z_R \cdot \sigma_R \quad S = \mu_S + Z_S \cdot \sigma_S$$

La funció límit  $g(R,S)=R-S$  es pot expressar com:

$$g(Z_R, Z_S) = \mu_R + Z_R \cdot \sigma_R - \mu_S - Z_S \cdot \sigma_S = (\mu_R - \mu_S) + Z_R \cdot \sigma_R - Z_S \cdot \sigma_S$$

Aquesta equació representa una línia recta a l'espai de les variables reduïdes  $Z_R$  i  $Z_S$  per a un valor específic qualsevol de la funció d'estat límit  $g(Z_R, Z_S)$  Veure figura 2.9:

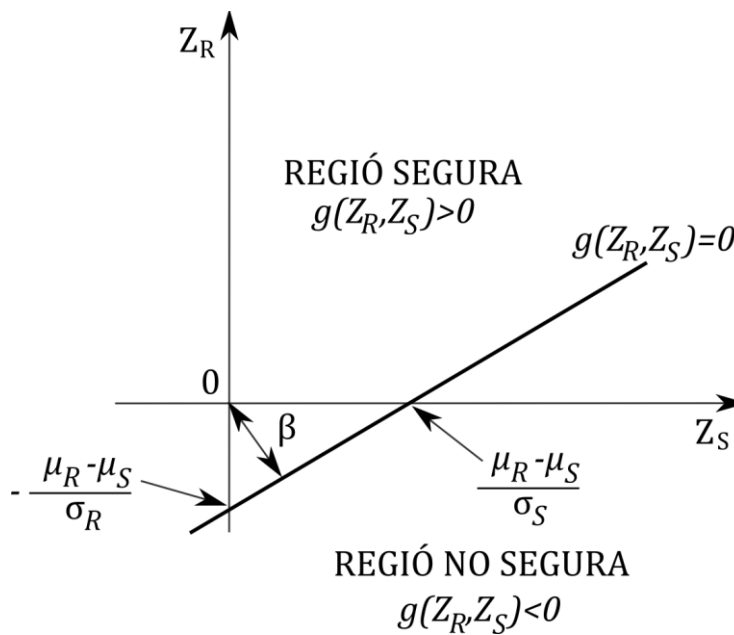


Figura 2.9 Funció d'estat límit i variables reduïdes

Podem calcular l'índex de fiabilitat (la distància més curta) amb la següent fórmula:

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}$$

On  $\beta$  és l'invers del coeficient de variació de la funció  $g(R,S)=R-S$  quan  $R$  i  $S$  són independents.

### 2.2.6. La funció de fiabilitat

La funció de fiabilitat és la funció que es fa servir més sovint a l'enginyeria de fiabilitat i l'**anàlisi de dades de vida** (*life data analysis*). Aquesta funció ens dona la probabilitat de qualsevol ítem operant per un període de temps sense cap fallada, és a dir, és una funció dependent del temps en que cada valor de temps té associat un valor de fiabilitat. Sempre que donem un valor de fiabilitat aquest ha d'anar acompanyat d'un valor de temps, com ara un 95% de fiabilitat als 2 anys, és a dir: indiquem un valor de fiabilitat amb el valor de temps corresponent.

El grau de flexibilitat de la funció de fiabilitat fa que sigui una opció millor per l'anàlisi que el MTTF (temps mitjà fins la fallada), que representa només un estadístic resum al llarg de la funció de probabilitat.

Per descriure de forma complerta la distribució de fiabilitat d'una variable aleatòria continua necessitarem conèixer la seva **funció de densitat de probabilitat** (PDF) i la **funció de densitat acumulada** (CDF) que podem veure a les fig. 2.12 i 2.13.

La funció de densitat de probabilitat representa la freqüència relativa dels valors de determinades variables aleatòries. Els valors centrals indiquen els valors més probables i les regions perifèriques els menys probables. Si la informació no és disponible per un PDF els valors dels límits superior i inferior poden ser apropiats per representar aquest tipus d'incerteses. A la figura 2.10 podem veure una PDF amb la funció de fallada (ombrejada) i la funció que representa la probabilitat d'èxit.

Siguin  $f(x)$  i  $F(x)$  les funcions de densitat (PDF) i de distribució (CDF) d'una variable aleatòria que representa el temps de vida o duració  $(0, \infty)$ , es defineix la **Funció de Fiabilitat** com:

$$R(t) = P(T > t) = 1 - F(t)$$

Per aquest motiu anomenarem a  $F(x)$  Funció "sense fiabilitat" (*unreliability*)  
I tindrem que:

$$f(t) = F'(t) = -R'(t)$$

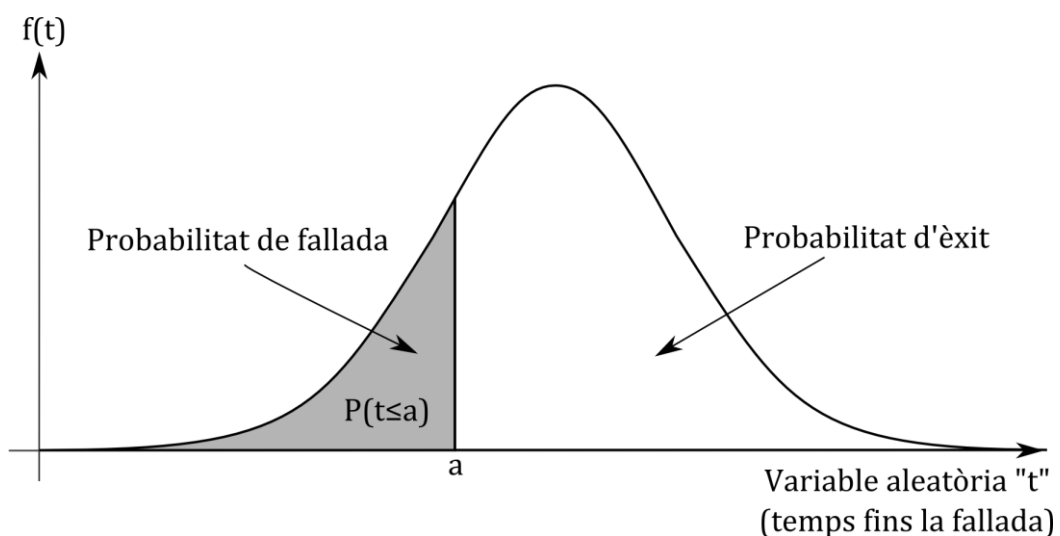


Figura 2.10 Funció "fiable" i "sense fiabilitat"

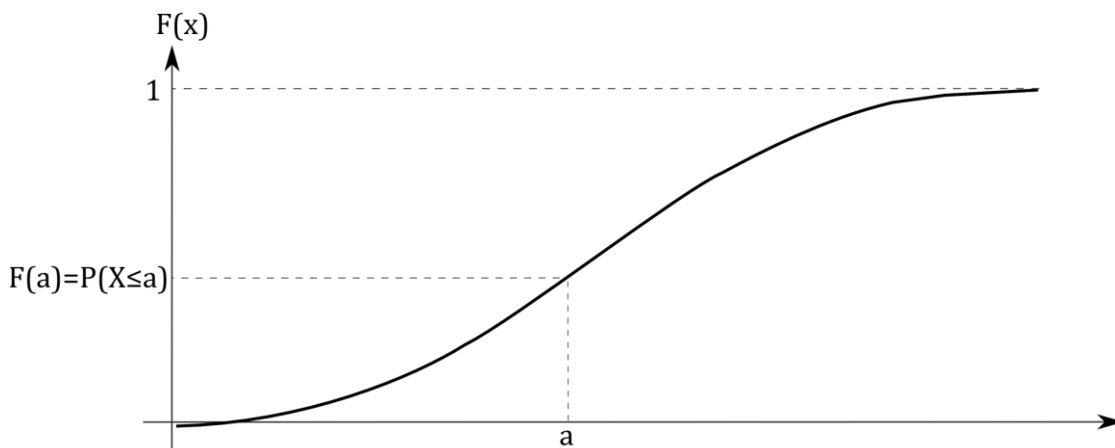
La relació matemàtica entre la PDF i la CDF és:

$$F(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(s) ds$$

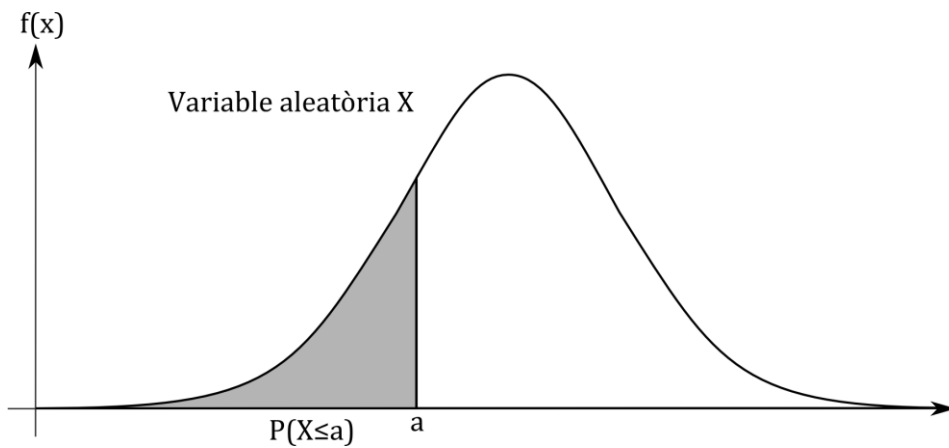
on  $s$  és una variable d'integració fictícia.

El valor de la funció de densitat acumulada en el punt "a" (fig 2.11) és l'àrea sota la funció de densitat de probabilitat fins "a" (fig 2.12).

L'àrea total sota la funció de densitat de probabilitat (PDF) és sempre igual a 1.

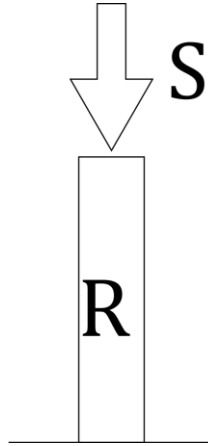


**Figura 2.11** Funció de densitat acumulada (CDF)



**Figura 2.12** Funció de densitat de probabilitat (PDF)

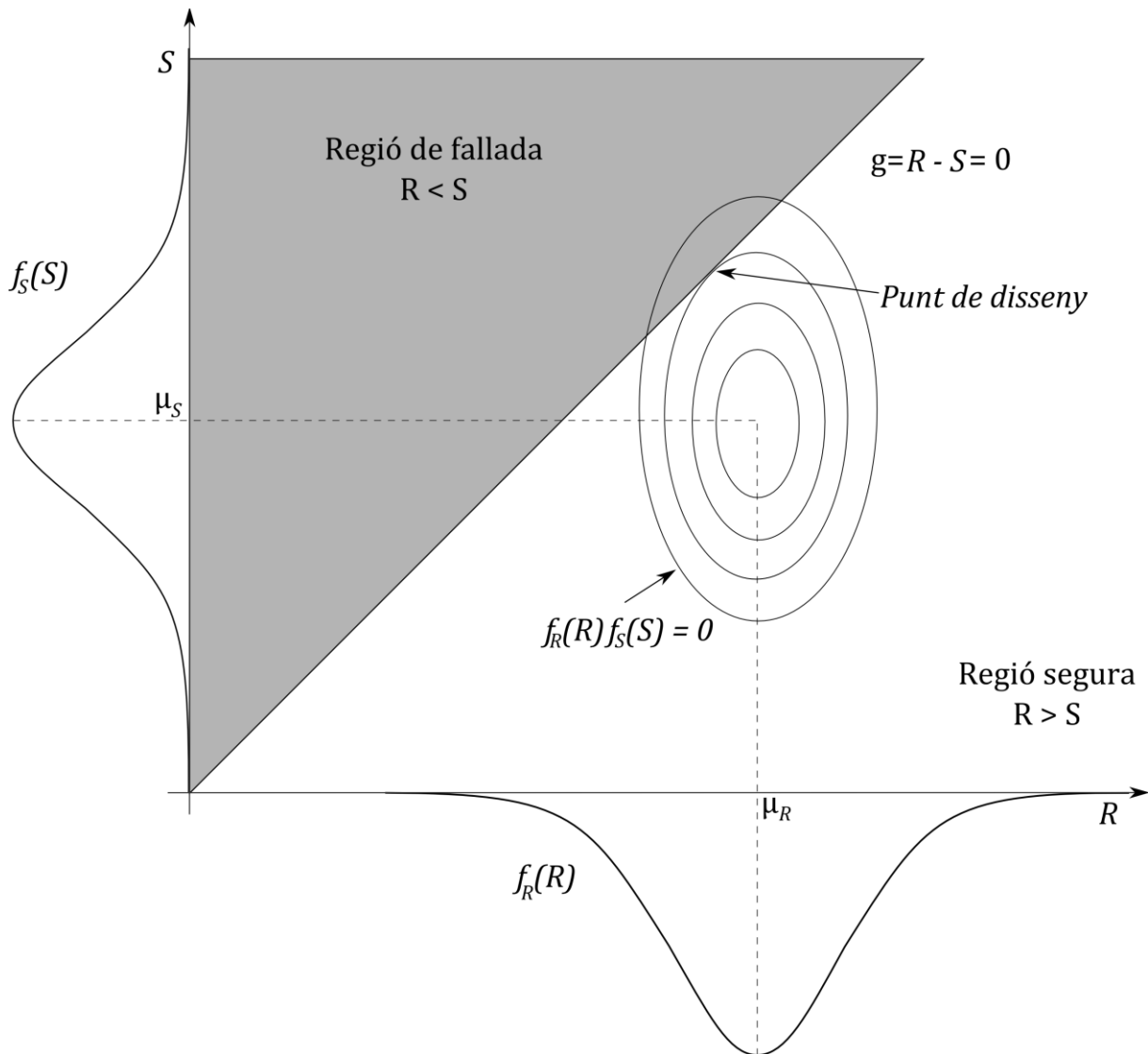
Com a exemple d'un problema de fiabilitat senzill podem considerar un pilar amb una resistència  $R$  sotmès a una acció  $S$  (figura 2.13). Considerem  $R$  i  $S$  variables aleatòries independents, no negatives, amb funcions de densitat de probabilitat  $f_R(R)$  i  $f_S(S)$ . La fallada es dona si  $R \leq S$



**Figura 2.13** Representació d'un pilar de resistència  $R$  sotmès a una càrrega  $S$

La  $R$  representa la resposta de l'estructura gràcies a la geometria i els materials, i la  $S$  és l'efecte de les accions exteriors.

Si ajuntem en un mateix gràfic les funcions de la **Resistència** i de les **Accions** podem veure com es pot trobar el punt òptim o de disseny mitjançant les interseccions d'ambdues, a la figura 2.14:



**Figura 2.14** Densitat de probabilitat conjunta de les variables  $R$  i  $S$ .

La Figura 2.13 mostra l'anomenat punt de disseny que és el punt de la superfície de fallada on la funció de densitat de probabilitat conjunta aconseguix el valor màxim, és a dir, el punt de fallada més probable. En un eix tenim la funció de la resistència  $R$  i a l'altre la funció de la sol·licitació  $S$ . Fent la intersecció de les dues funcions podem veure en quin punt tallen la funció  $g$  que representa el marge de seguretat ( $R - S$ ).



La funció de densitat de probabilitat també és una eina amb la que podem analitzar la superfície de intersecció entre les funcions de Sol·licitació i Resistència, **l'àrea de solapament crítica** (figura 2.15), que és on es produeix la fallada de l'estructura: Les accions,  $s$  són més grans que la resistència o resposta de l'estructura:

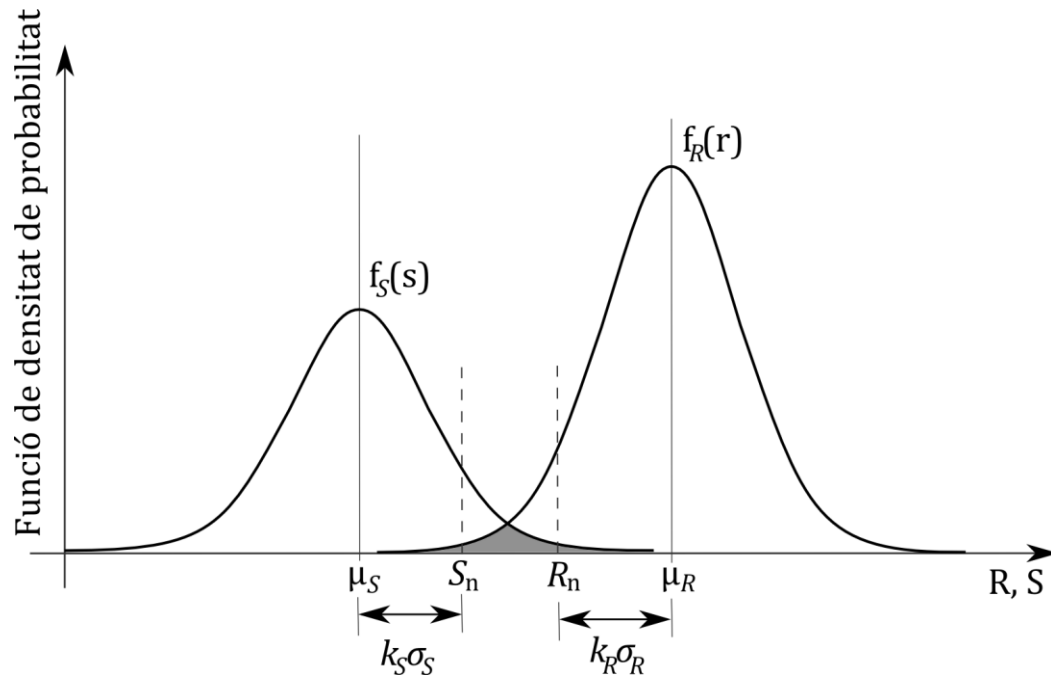


Figura 2.15 Funció de densitat de probabilitat (PDF) de la Sol·licitació i Resistència

### 2.2.7. El coeficient de seguretat

El **coeficient de seguretat**, també anomenat factor de seguretat, és el nombre que resulta en dividir el valor de la capacitat màxima d'un sistema entre els requeriments teòrics o normals. Un exemple seria posar la resistència o termes favorables d'un material al numerador i les accions o termes desfavorables al denominador.

El coeficient de seguretat obtingut mitjançant aquesta fórmula el compararem amb el coeficient de seguretat desitjat per tal de verificar si compleix o no amb els requisits de seguretat. Aquest coeficient es fa servir a tots els camps de l'enginyeria i construcció.

$$F = \frac{R}{S}$$

On:

$F$  = Factor de seguretat de l'estructura.

$R$  = Resposta estructural (geometria, materials, etc.)

$S$  = Efecte de les accions exteriors.

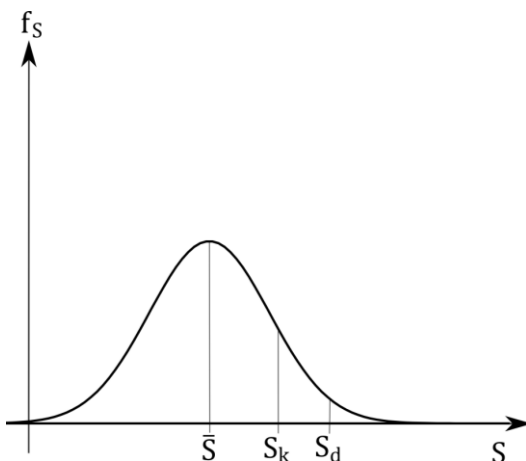
Segons aquesta fórmula, sempre que  $F > 1$  voldrà dir que estem del costat de la seguretat.

El valor del coeficient de seguretat té en compte les incerteses conegudes i desconegudes associades al procés de càlcul, i ha estat definit per la experiència i els assaigs fets en cada camp d'aplicació.

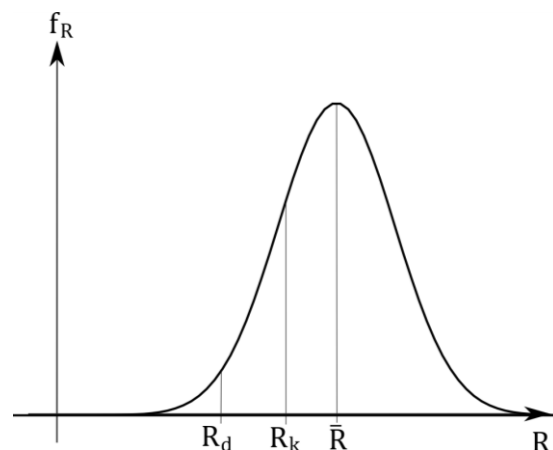
A la construcció ens trobem que les variables  $R$  i  $S$  presenten un grau d'incertesa en els seus valors que farà necessari que per poder obtenir un valor del factor de seguretat amb precisió hem de considerar-les com a variables aleatòries, complicant-se el seu càlcul.

D'altra banda, quan calculem mitjançant el mètode determinista podem definir variables bàsiques associades a certs quantils o probabilitats de superació. Aquests valors determinaran els valors característics de  $R$  i  $S$ :  $R_k$  i  $S_k$ . Per no superar la probabilitat de fallada assumible de l'estructura, es calculen els coeficients que minoren la resistència i majoren les accions a l'hora de comprovar els estats límits, obtenint així els valors de disseny  $R_d$  i  $S_d$  (Sobrino, 1993).

La funció de la resistència ha de tenir valors més alts, com podem veure si comparem les figures 2.16 i 2.17:



**Figura 2.16** Funció densitat de probabilitat de les accions ( $S$ ), valors característics i de disseny segons mètodes deterministes.



**Figura 2.17** Funció densitat de probabilitat de resposta ( $R$ ), valors característics i de disseny segons mètodes deterministes.

El Factor de Seguretat (coeficient de seguretat) s'entén normalment com la proporció entre la resistència de l'element i la càrrega esperada. A la pràctica tant la resistència com la càrrega són variables, i obtenim els seus valors mitjançant una anàlisi estadística de la seva distribució.

Quan considerem la dispersió de les variables, el factor de seguretat pot ser inferior a la unitat. Normalment el factor de seguretat és molt conservatiu amb la conseqüència que obtindrem dissenys molt més cars. D'altra banda, el disseny estocàstic (aleatori), millora la fiabilitat del disseny (Choi, 2006).

### 2.3. Fiabilitat estructural a l'edificació.

Gràcies a les normatives actuals, com ara el Codi Tècnic de l'Edificació (CTE), s'ha introduït el concepte de fiabilitat estructural dins de les exigències bàsiques pel disseny i construcció dels edificis. L'objectiu del requisit bàsic "Seguretat Estructural" consisteix a assegurar que l'edifici tingui un comportament estructural adequat davant les accions i influències previsibles a les que pugui estar sotmès durant la seva construcció i ús previst. A l'article 10 del CTE s'indica: "Per satisfer aquest objectiu, els edificis es projectaran, fabricaran, construïran i mantindran de manera que compleixin, amb una fiabilitat adequada, les exigències bàsiques que s'estableixen en els apartats següents. Els Documents Bàsics "DB SE Seguridad Estructural", "DB-SE-AE Acciones en la edificación", "DB-SE-C Cimientos", "DB-SE-A Acero", "DB-SE-F Fábrica" i "DB-SE-M Madera", especifiquen paràmetres objectius i procediments de manera que el seu compliment assegura la satisfacció de les exigències bàsiques i la superació dels nivells mínims de qualitat propis del requisit bàsic de seguretat estructural." A l'annex C del CTE es tracten els principis dels mètodes probabilistes explícits i implícits. Els mètodes implícits són la base en què es fonamenten els Capítols 3, 4 i 5 del CTE. Els mètodes probabilistes explícits es basen en definir com a variables aleatòries les accions (permanents, variables i accidentals) a les que pot estar sotmesa una estructura. És el anomenat càlcul probabilístic de la fiabilitat, com veurem més endavant.

Existeixen diferents mètodes de càlcul d'estructures que amb el pas del temps han anat evolucionant gràcies a l'ampliació dels coneixements i l'experiència acumulada. En l'actualitat el mètode de càlcul més utilitzat pel càlcul de les estructures d'edificació és el mètode dels coeficients parcials de seguretat. El mètode de les tensions admissibles, ja en desús, es fa servir gairebé en exclusiva pel càlcul de fonamentacions. El mètode del coeficient global de seguretat, també en desús, ens el podem trobar en canvi a la normativa ROM (*Recomendaciones de Obras Marítimas*). En els punts 2.3.2 a 2.3.5 s'expliquen resumidament, i de forma cronològica, cada un d'aquets mètodes i es fa una introducció als mètodes probabilístics, que són els únics que ens permetran calcular la probabilitat de fallada d'una forma directa i obtindre així una avaluació exacte de la fiabilitat.

Per fer un càlcul estructural partim del predimensionat on definim les seccions dels elements que componen l'estructura. Es treballa amb les seccions brutes i en el cas de les estructures de formigó, es calcula l'armat corresponent per resistir els esforços obtinguts a l'anàlisi estructural. Aquest càlcul es pot fer mitjançant el mètode clàssic (tensions admissibles) o el dels estats límit (mètode de càlcul en trencament).

Es denominen estats límit aquelles situacions per a les quals, en cas de ser superades, es pot considerar que l'edifici no compleix algun dels requisits estructurals pels quals ha estat concebut (*CTE DB-SE, 2009*). L'anàlisi estructural es basarà en un model adient, precís i complert. El compliment de les exigències estructurals, calculades amb el mètode dels estats límit, es comprovarà utilitzant el format dels coeficients parcials;

alternativament les comprovacions es poden basar en una aplicació directa dels mètodes d'anàlisi de fiabilitat descrits a l'annex C del CTE DB-SE.

A la figura 2.18 veiem els dos mètodes de càlcul d'estructures citats anteriorment, el mètode de les tensions admissibles i el mètode de l'estat límit, on podem comparar les diferències que hi ha entre ells a l'hora de tractar cadascuna de les fases:

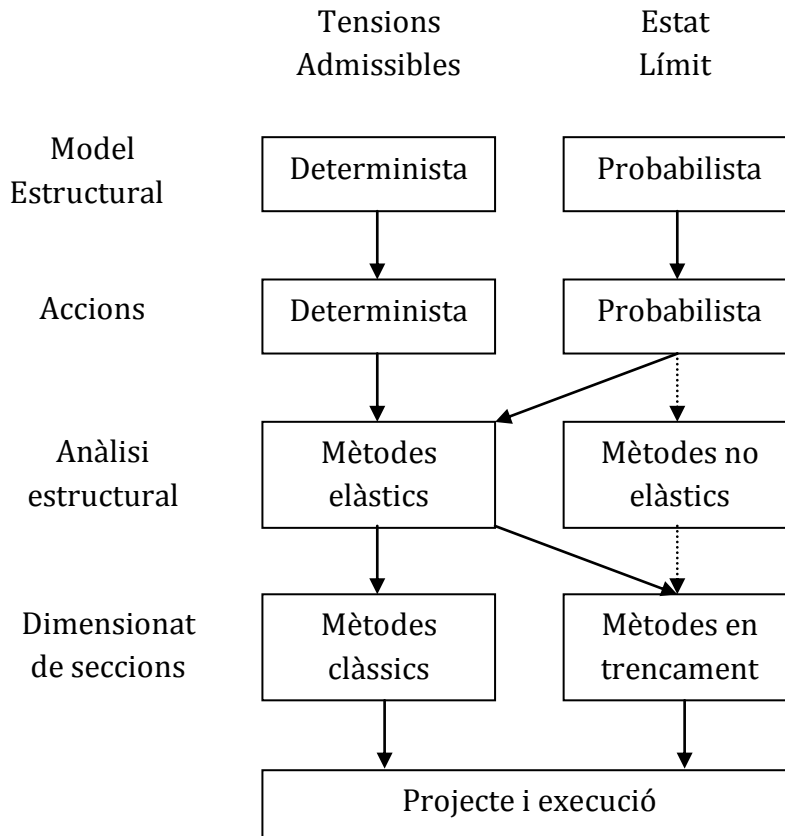


Figura 2.18 Esquema general dels sistemes de càlcul d'estructures (Pérez, 2000)

### 2.3.1. Identificació i anàlisi de les incerteses

Tot càlcul referent a una obra de construcció té associades unes incerteses relatives a la geometria i propietats dels materials, càrregues, etc. A les estructures se'ls demana cada vegada dissenys més complexos; de la mateixa manera s'ha incrementat la necessitat d'una aproximació acurada i eficient d'aquestes incerteses.

Les tècniques d'anàlisi de la fiabilitat ajuden a desenvolupar una guia inicial pel disseny robust. També es poden fer servir per identificar els elements que contribueixen més a la incertesa dels sistemes estructurals o de quina forma una major recerca, tests i control de qualitat poden incrementar la seguretat i eficiència de l'estructura (Choi,2006).

Els diferents tipus d'incerteses que podem identificar normalment són:

- Aleatorietat implícita en les accions, en les propietats dels materials i en les dades geomètriques.
- Incertesa estadística deguda a la inevitable limitació en el nombre de dades disponibles.
- Incerteses en els models per a les resistències i els efectes de les càrregues degudes a les simplificacions inevitables que suposa el model.
- Vaguetats degudes a definicions poc precises dels requisits prestacionals.
- Errors importants de càlcul, ja sigui en la fase d'execució d'obra o en la de l'ús de l'estructura.
- Manca de coneixements en el moment present respecte a les accions i al comportament dels nous materials.

Aquestes incerteses no poden ser eliminades totalment i és per això que les haurem de tenir sempre presents (*Holický, M. & Vrouwenvelder, T., 1990*).

Les incerteses les classifiquem en dues categories:

- Aleatòries (Objectiu)
- Epistèmiques (Subjectiu)

La diferencia entre les dues incerteses la podem entendre amb un exemple que es fa servir molt sovint als llibres de probabilitat: l'aniversari d'una persona. Si preguntem a una persona qualsevol quina és la probabilitat que una altre faci anys un dia determinat de l'any, aquella ens dirà que la probabilitat és de  $1/365$ ; però si li preguntem a un amic d'aquesta persona és possible que ens pugui dir aquesta informació amb una probabilitat de  $1/65$ , per exemple en cas que no sàpiga el dia exacte però que tingui la certesa que és un dia de un mes o un altre. L'amic persona ens donarà una probabilitat més gran comparada amb la primera persona, de totes maneres l'exactitud de la seva resposta depèn del grau de creença (subjectiu).

Ja que la incertesa subjectiva és vista com a reductible en la mesura que recopilem més informació (recopilada en base a experiències passades o de l'opinió d'experts) requereix més atenció i un judici més acurat (*Choi, 2006*).

La representació de les incerteses es fan mitjançant gràfics de densitat de probabilitat o freqüència (PDF) que hem vist a l'apartat 2.2.6 i al interval d'informació.

L'experiència pot limitar les incerteses però l'home pren riscos nous degut al seu desig de fer construccions més atrevides i innovadores. Les incerteses en les dades estan generalment acceptades per tothom, però no ha estat fins fa poc que també ha estat acceptada l'incertesa dels models. Les eines de càlcul de què disposem en l'actualitat ens permeten obtenir uns resultats aproximats perquè les dades inicials d'aquest càlcul estan, molt sovint, sotmeses a les incerteses. Els fenòmens aleatoris són deguts al desconeixement que tenim de totes les dades necessàries pel seu anàlisi (*Lemaire, 2009*).

L'aleatorietat natural i les incerteses estadístiques es poden descriure relativament bé mitjançant mètodes de teoria de la probabilitat i matemàtica estadística. L' Eurocodi EN 1990 proporciona algunes referències sobre les tècniques disponibles en aquest sentit. No obstant això, la manca de dades experimentals contrastades sol ser causa de problemes (p. ex. per a nous materials, per a algunes accions com la influència del medi ambient, i també per a algunes magnituds geomètriques). En alguns casos les dades disponibles no tenen homogeneïtat atès que han estat obtingudes sota diferents condicions (p. ex. per a la resistència del material, sobrecàrregues, influències ambientals, en les dimensions interiors d'una secció transversal de formigó reforçat). En aquestes circumstàncies és difícil, si no impossible, analitzar i utilitzar aquestes dades en el càlcul.

Les incerteses dels models que requereixen d'ordinador es poden avaluar fins a cert punt d'acord amb una indagació teòrica i experimental (poden trobar-se en aquest sentit algunes orientacions en EN 1990 i en els documents del JCSS). Les indeterminacions ocasionades per definicions imprecises (en particular pel que fa als requisits de servei) es poden esmenar parcialment mitjançant tècniques de lògica borrosa. No obstant això, aquests mètodes tenen poca transcendència a nivell pràctic, ja que poques vegades es pot disposar de les dades experimentals necessàries.

D'altra banda, el coneixement del comportament de les noves estructures i materials es poden anar incrementant gradualment a través d'anàlisi teòrics contrastats per l'experiència.

L'absència d'eines teòriques disponibles resulta evident en els casos de llacunes de coneixement i errors importants de càlcul que, no obstant, constitueixen sovint les causes que motiven les fallades estructurals. Per limitar els errors deguts a causes humanes pot resultar de gran eficàcia establir un sistema de control de qualitat basat en mètodes d'inspecció estadística.

S'han desenvolupat diverses tècniques operacionals i mètodes de càlcul que consideren les incerteses esmentades i que han estat mundialment acceptats. La teoria de la fiabilitat estructural proporciona una base teòrica així com conceptes tècnics que permeten la descripció i l'anàlisi de totes aquelles incerteses relatives a la fiabilitat d'una determinada estructura. (*Holický, 1990*)

### 2.3.2. Estat límit de servei

Un **estat límit de servei** és aquell que, de ser superat, influeix en el confort i el benestar dels usuaris o de terceres persones, al correcte funcionament de l'edifici o l'aparença de la construcció. L'estat límit de servei pot ser reversible o irreversible. La reversibilitat es refereix a les conseqüències que excedeixin el límit especificat com admissible, un cop desaparegudes les accions que l'han produït.

Com estats límit de servei s'han de considerar els relatius a:

- les deformacions (fletxes, assentaments o desploms) que afecten l'aparença de l'obra, al confort dels usuaris, o al funcionament d'equips i instal·lacions;
- les vibracions que causin una manca de confort de les persones, o que afectin la funcionalitat de l'obra;
- els danys o el deteriorament que poden afectar desfavorablement a l'aparença, a la durabilitat o la funcionalitat de l'obra.

En termes generals es pot definir un grau d'aptitud al servei  $\mu$  en relació amb un paràmetre relacionat amb el comportament en servei  $\lambda$ , que pot tenir dos límits,  $\lambda_1$  i  $\lambda_2$ , (figura 2.19). Per sota del primer límit ( $\lambda_1$ ) l'obra es pot fer servir sense restriccions, en canvi, a partir del segon ( $\lambda_2$ ) l'obra no es pot utilitzar:

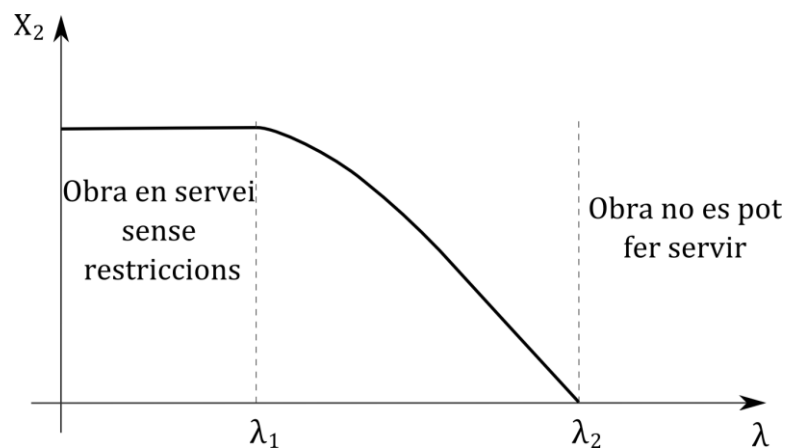


Figura 2.19 Grau de l'aptitud al servei  $\mu$ , en funció del paràmetre de servei  $\lambda$  (CTE DB SE, 2009)

Un exemple d'un estat límit de servei el podem veure a la següent fotografia (figura 2.20) que mostra un edifici amb danys produïts per un terratrèmol. Els sostres de la planta baixa i superiors de l'edifici han sofert un desplaçament horitzontal molt gran, apreciable a simple vista. Aquesta deformació és, de ben segur, superior a  $\lambda_1$  i, molt probablement, també a  $\lambda_2$ .



Figura 2.20 Edifici amb danys per un terratrèmol

### 2.3.3. Estat límit últim

Els **estats límit últims** són els que, de ser superats, constitueixen un risc per a les persones, perquè produeixen el col·lapse total o parcial del mateix (*CTE DB SE, 2009*).

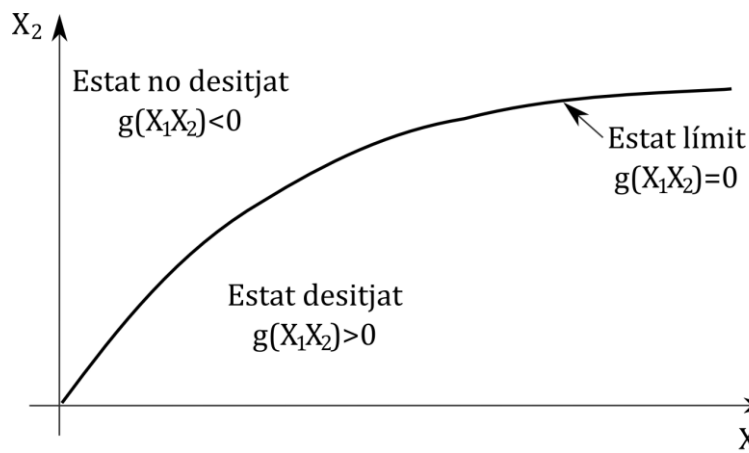
Com estats límit últims s'han de considerar els deguts a:

- pèrdua de l'equilibri de l'edifici, o d'una part estructuralment independent, considerat com un cos rígid;
- fallada per deformació excessiva, transformació de l'estructura o de part d'aquesta en un mecanisme, trencament dels seus elements estructurals (inclosos els suports i la fonamentació) o de les seves unions, o inestabilitat d'elements estructurals incloent-hi els originats pels efectes dependents del temps (corrosió, fatiga).

Suposem que el criteri de fallada d'una estructura o d'un element estructural es regeix segons una funció  $g(X)$  de les variables bàsiques  $X$ , de manera que:

| Per a l'estat desitjat | Per a l'estat límit    | Per a l'estat no desitjat |
|------------------------|------------------------|---------------------------|
| $g(\underline{X}) > 0$ | $g(\underline{X}) = 0$ | $g(\underline{X}) < 0$    |

A la figura 2.21 podem veure una representació d'aquesta funció d'estat límit de dos variables, que limita l'estat no desitjat  $g(X_1, X_2) < 0$  amb l'estat desitjat  $g(X_1, X_2) > 0$ :



**Figura 2.21** Representació de la funció  $g(X)$  amb dues variables bàsiques  $X_1$  i  $X_2$ ;  $X = (X_1, X_2)$

Les variables bàsiques  $X$  poden dependre del temps, com per exemple:

- { Accions mediambientals extremes
- { Mecanismes de deteriorament dels materials constitutius
- { Disminució de resistència degut a processos de fatiga

La variabilitat amb el temps significa que els mínims i els màxims de les variables de  $X$  no es produeixen al mateix temps. La probabilitat de fallada està associada amb un període de referència triat  $t_0$ .

Per a la majoria dels estats últims la probabilitat de fallada es pot representar amb la relació:



$$P_f = P[g(S) < 0]$$

I la probabilitat que no existeixi la fallada de l'estructura o l'element estructural:

$$P_s = 1 - P_f \quad (P_s: \text{Probabilitat de supervivència o fiabilitat})$$

En els casos on existeix més d'un mecanisme de fallada d'un element estructural hem de fer servir les funcions compostes. Normalment l'estat límit de servei precedeix l'estat límit últim encara que es pot donar el cas que en una estructura ens trobem l'estat límit últim directament, com per exemple en el cas d'un ensorrament sobtat d'un edifici.

A la figura 2.22 podem veure els efectes del terratrèmol de magnitud 6.8 que va tenir lloc a Califòrnia el 17 de Gener de 1994. Degut a l'ensorrament dels sostres, en cada rèplica la façana sustentada amb pilars de formigó armat es doblegava cap a l'interior. Aquest és un cas on l'estat límit últim ha estat superat: l'edifici ha col·lapsat quedant totalment inutilitzat pel seu ús, amb risc per a les persones.



Figura 2.22 Parking de la universitat de Califòrnia després del terratrèmol.  
(foto: M. Celebi, U.S. Geological Survey)

### 2.3.4. Mètode tensions admissibles

En anglès se'l coneix per ASD: *Allowable Stress Design*. (Disseny de Tensions Admissibles). En aquest mètode les incerteses les valorem amb un únic coeficient "k", no resultant possible considerar les incerteses de cada variable bàsica individualment. La tensió màxima ( $\sigma_{\max}$ ) a la que volem sotmetre l'element estructural haurà de ser inferior a la tensió admissible ( $\sigma_{\text{adm}}$ ), que és la tensió crítica ( $\sigma_{\text{crit}}$ ) a la que trenca l'element dividit pel coeficient "k". Aquest coeficient és sempre major que 1.

$$\sigma_{\max} < \sigma_{\text{adm}} \quad ; \quad \text{amb} \quad \sigma_{\text{adm}} = \frac{\sigma_{\text{crit}}}{k}$$

La fiabilitat es garanteix mitjançant el comportament local (elàstic). No hi ha cap alternativa que permeti una distribució de tensions no lineal o que tingui en compte la ductilitat dels elements i materials de l'estructura. Per aquestes raons el mètode de les

tensions admissibles tendeix a presentar normalment resultats conservatius i antieconòmics. Tampoc permet considerar incerteses en els models computacionals emprats per avaluar els efectes de la càrrega i les resistències estructurals. En conseqüència, quan el càlcul fa referència a estructures exposades a diferents accions i elaborades amb diversos materials, el nivell de fiabilitat pot resultar no només conservatiu (antieconòmic) sinó a més, notòriament distorsionat. (*Holický, M. & Vrouwenvelder, T., 1990*) Aquest mètode es caracteritza per l'ús de les càrregues de treball (de valors nominals fixats als codis) sense majorar, i l'aplicació d'un coeficient de seguretat únic aplicat a la resistència nominal (característica o mitja).

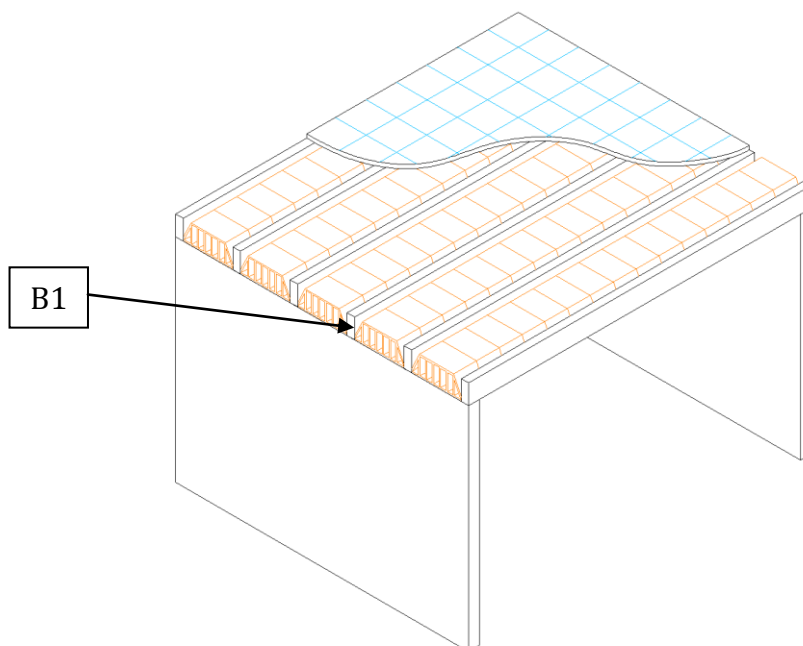
El problema que presenta és que existeix una gran variabilitat entre la definició de les càrregues mortes (per propi inclòs) i les càrregues variables (sobrecàrrega d'ús) ja que aquestes últimes són molt més difícils de predir. Això ens impedeix obtenir una fiabilitat uniforme per a tota l'estructura.

Podem veure amb un exemple el funcionament d'aquest mètode:

Considerem una bigueta, que pertany a un forjat unidireccional, birecolzada en dues parets de càrrega. Aquesta bigueta serà un perfil metàl·lic IPE. El forjat forma part d'una casa unifamiliar de Planta Baixa i Planta Pis. (figura 2.23)

Partirem dels plànols d'arquitectura ja que defineixen l'esquema i geometria de l'estructura. La funció d'aquesta bigueta és la de suportar les següents càrregues:

- Pes propi, tant de la bigueta com de la part de forjat corresponent.
- Càrrega morta, que inclou el pes dels elements d'acabats: les rajoles del terra.
- Sobrecàrrega d'ús, que ve definida a la normativa (CTE) i depèn de l'ús que tingui l'edifici. En aquest cas l'ús és de vivenda.



**Figura 2.23** Perspectiva dels components del forjat.

El mètode de les tensions admissibles no fa distinció entre les diferents càrregues amb lo que podem sumar-les totes i aplicar-les a la bigueta en forma de càrrega lineal. (figura 2.24)

Per calcular aquesta biga hem d'obtenir el moment màxim produït per les càrregues i dimensionar-la, amb el material i la secció necessàries, perquè suporti aquest moment. El quocient entre el moment que pot aguantar la bigueta i el moment màxim calculat és el marge de seguretat.

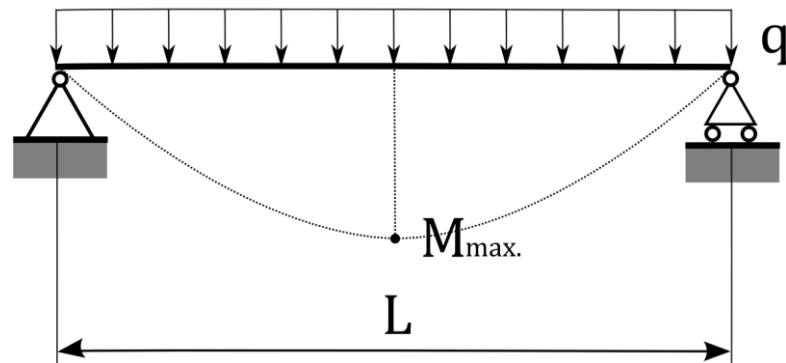


Figura 2.24 Esquema de biga amb les càrregues on es pot veure el Moment màxim.

Les dades d'aquest exemple son:

- llum  $L$  entre parets : 4,5m
- Intereix: 0.70m
- Pes propi forjat (0.26m cantell, revoltos ceràmics):  $3 \text{ kN/m}^2$
- Pes paviment habitatge:  $1 \text{ kN/m}^2$
- Pes propi bigueta no considerat
- Sobrecàrrega d'ús:  $2 \text{ kN/m}^2$  (segons CTE, per vivendes)
- Material: Acer S275 ( $f_y = 275 \text{ N/mm}^2$ )

El pes propi del forjat sobre la biga tenint en compte l'intereix és:  
 $(3 \text{ kN/m}^2 + 1 \text{ kN/m}^2) \times 0.7\text{m} = 2.8 \text{ kN/m}$

I el de la sobrecàrrega d'us és:  
 $2 \text{ kN/m}^2 \times 0.7\text{m} = 1.4 \text{ kN/m}$

En aquest cas com que el càlcul amb aquest mètode no fa diferenciació de les diferents càrregues a l'hora de aplicar el coeficient de seguretat les sumem totes i obtenim la càrrega lineal sobre la bigueta  $q$ :

$$q = 2.8 \text{ kN/m} + 1.4 \text{ kN/m} = 4.2 \text{ kN/m}$$

El moment  $M_{\max}$  produït per aquesta càrrega és:

$$M_{\max} = \frac{q \cdot L^2}{8} = \frac{4.2 \cdot 4.5^2}{8} = 10.631 \text{ m} \cdot \text{kN}$$

Aquest és el moment màxim al que està sotmès aquesta la bigueta. Ara hem de trobar un perfil metàl·lic que ens aguantí aquest moment màxim. Segons el mètode de les tensions admissibles hem de complir:

$$\sigma_{\max} < \sigma_{adm}$$

La  $\sigma_{adm}$  la obtindrem de la tensió crítica  $\sigma_{crit}$  dividit per un factor de seguretat  $k$ . Aquest factor de seguretat varia normalment entre 1.5 i 3, segons l'element estudiat, i és l'única mesura de seguretat que apliquem amb aquest mètode. En aquest exemple es pren un coeficient de 1.5:

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{crit}}{k}$$

$$\sigma_{adm} = \frac{275 \text{ N / mm}^2}{1.5} = 183.33 \text{ N / mm}^2$$

La  $\sigma_{\max}$  la calcularem dividint el Moment màxim que hem calculat pel mòdul resistent elàstic de la secció,  $W_{el,y}$  (comportament elàstic i lineal del material):

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_{el,y}} = \frac{10.63 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}^2}{W_{el,y}}$$

Com que volem que  $\sigma_{\max} \leq \sigma_{adm}$  :

$$\frac{10.63 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}^2}{W_{el,y}} \leq 188.33 \text{ N / mm}^2$$

$$\frac{10.63 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}^2}{188.33 \text{ N / mm}^2} \leq W_{el,y}; \quad W_{el,y} \geq 56.443 \cdot 10^3$$

Al promptuari de perfils metàl·lics trobem que el perfil que compleix aquest  $W_{el}$  és el IPE 140 amb  $W_{el,y} \geq 77.32 \cdot 10^3$ , per lo que serà aquest el que triarem.

### 2.3.5. Mètode del coeficient global de seguretat

El mètode del coeficient global de seguretat consisteix en relacionar els valors estàndard o nominals de la resistència estructural "R" amb l'efecte de la càrrega "S".

La idea és que els esforços aplicats en una estructura a causa d'aquestes càrregues (de servei) no excedeixin el límit elàstic (valor a partir del qual pot trencar el material).

El coeficient de seguretat obtingut "s" haurà de ser major que el valor desitjat "s<sub>0</sub>".

$$s = \frac{R}{S} > s_0$$

Aquest mètode pretén aproximar-se a hipòtesis més realistes sobre el comportament estructural dels elements i les seves seccions transversals, considerant una distribució de tensions en la secció amb absència de linealitat, i ductilitat dels materials. Es tenen en compte tots aquests factors a través dels valors resultants per a la resistència estructural R i l'efecte de les accions S. No obstant això, i de la mateixa manera que en el cas del mètode de les tensions admissibles, la principal insuficiència d'aquest mètode

rau en la impossibilitat de considerar incerteses per a les magnituds bàsiques i per als models teòrics. La probabilitat d'error només pot ser controlada, de la mateixa manera que en el mètode anterior, mitjançant una única quantitat explícita, en aquest cas el coeficient global de seguretat "s". (Holický, M. & Vrouwenvelder, T., 1990).

Aquest factor de seguretat es definia mitjançant l'experiència. A l'any 1840, per exemple, al Regne Unit s'aplicava un factor de seguretat:  $s_0=4$  si es dissenyava un edifici i  $s_0=6$  per un pont (Xila, 2007). En el cas de la resistència al moment flector dels elements de formigó armat el  $s_0$  normalment és de 1.9.

Si fem servir el mateix exemple del punt anterior, calculant la bigueta mitjançant el mètode del coeficient global de seguretat tindrem:

El quocient (s) entre la resistència (R) de l'element i l'efecte de les accions (S) a que està sotmesa la bigueta ha de ser més gran o igual al coeficient de seguretat global.

Per aquest exemple prendrem  $s_0=2$ :

$$s = \frac{R}{S} \geq s_0$$

En aquest cas, R és el moment flector màxim que pot resistir una secció IPE d'acer S275, acceptant una distribució de tensions no lineal (plastificació) i S és el moment flector màxim que ha de suportar la secció, calculat a partir de les accions que actuen sobre de la bigueta:

$$R = M_u = W_{pl,y} \cdot f_y$$

$$S = M_{max} = \frac{q \cdot L^2}{8}$$

Llavors:

$$\frac{W_{pl,y} \cdot 275 \text{ N / mm}^2}{10.63 \cdot 10^6 \text{ mm} \cdot \text{N}} \geq 2; \quad W_{pl,y} \geq \frac{2 \cdot 10.63 \cdot 10^6}{275}; \quad W_{pl,y} \geq 77.31 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

Buscant en el promptuari de perfils metàl·lics trobem que el primer que compleix és el IPE 140 amb  $W_{pl,y} = 88.34 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$

### 2.3.6. Mètode dels coeficients parcials (semi-probabilístic)

En anglès se'l coneix per LRFD, *Load and Resistance Factor Design*, (Càlcul per Factors de Càrrega i Resistència). Va ser formulat a la Unió soviètica en la dècada de 1930 i desenvolupat a Europa en la dècada de 1960. Va ser el resultat d'un compromís entre el mètode de les tensions admissibles i el mètode del coeficient global.

El mètode dels coeficients parcials és el mètode més utilitzat en l'actualitat pel càlcul estructural. Està basat en els conceptes probabilístics sobre fiabilitat estructural. Habitualment s'aplica utilitzant el concepte d'estats límit (de servei i últim). Aquest mètode es basa en la minoració de resistències i la majoració de les càrregues.

Amb aquest mètode es pot determinar el nivell de fiabilitat de l'estructura gràcies als coeficients parcials i la resta de paràmetres relatius.

$$E_d (F_d, f_d, a_d, \theta_d) < R_d (F_d, f_d, a_d, \theta_d)$$

Els valors de càlcul de l'efecte  $E_d$  de les accions i de la resistència estructural  $R_d$  es determinen a partir dels valors de càlcul que prenen les variables bàsiques de les accions  $F_d = \psi \gamma_F F_k$ , les propietats del material  $f_d = f_k / \gamma_m$ , les dimensions  $a_d + \Delta a$ , i els models d'incertesa  $\theta_d$ . Els valors de càlcul d'aquestes variables indicades es determinen a la seva vegada (tenint en compte les diferents incerteses) mitjançant els valors característics ( $F_k, f_k, a_k, \theta_k$ ), els coeficients parcials de seguretat  $\gamma$ , els coeficients de simultaneïtat  $\psi$  i altres mesures de fiabilitat.

Permet harmonitzar la fiabilitat en estructures compostes de materials diferents, però sense arribar a la precisió dels mètodes probabilístics. (*Holický, M. & Vrouwenvelder, T., 1990*) Els diferents factors de càrrega i resistència permeten obtenir un grau d'incertesa de les diferents càrregues i de les seves combinacions, a més d'una resistència prevista més exacte.

En qualsevol cas, el mètode estadístic només es fa servir per obtenir la resistència dels materials i els valors de les accions.

A la següent figura (2.25) podem veure esquematitzat el procés de càlcul mitjançant el mètode dels coeficients parcials de seguretat:

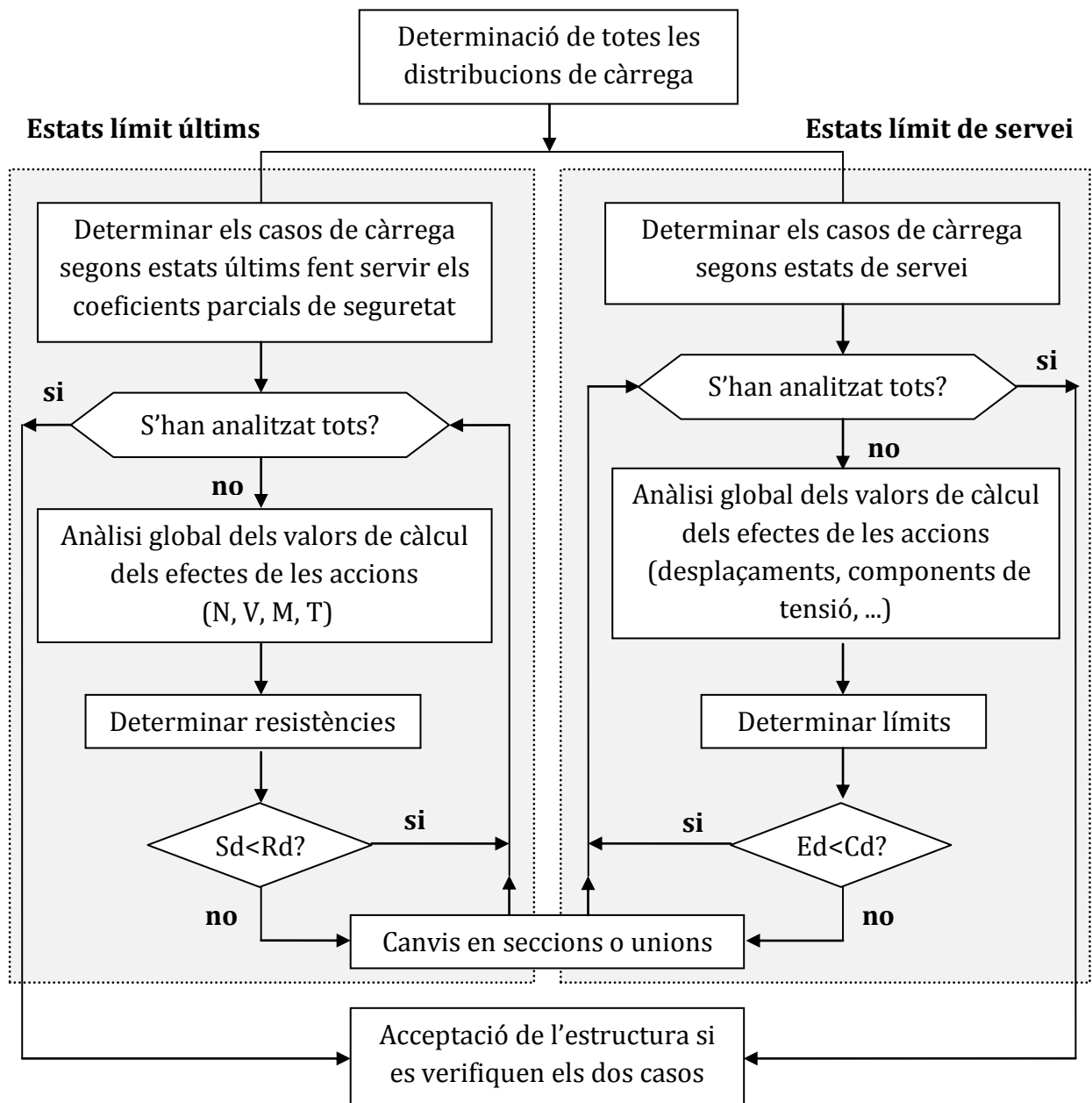


Figura 2.25 Procediment de verificació a través del mètode de coeficients parcials. (Sanpaolesi, 2005)

Amb les mateixes dades de l'exemple del punt 2.3.4 i 2.3.5 calcularem la biga mitjançant el mètode dels coeficients parcials per tal de comparar els tres mètodes i veure les diferències:

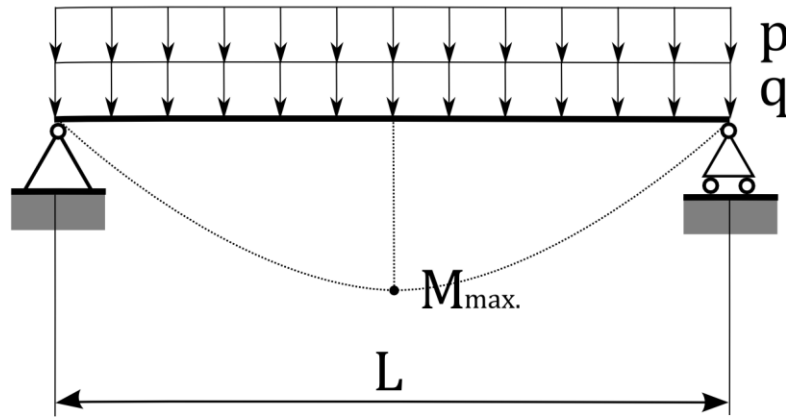


Figura 2.26 Esquema de biga amb les càrregues on es pot veure el Moment màxim.

Les dades són les mateixes:

- llum **L** entre parets : 4,5m
- Intereix: 0.70m
- Pes propi forjat (0.26m cantell, casetons): 3 kN/m<sup>2</sup>
- Pes paviment habitatge: 1 kN/m<sup>2</sup>
- Pes propi de la bigueta no considerat.
- Sobrecàrrega d'ús: 2 kN/m<sup>2</sup> (segons CTE, vivendes)

Com que amb aquest mètode cadascuna de les càrregues té el seu propi factor de seguretat hem considerat les següents càrregues lineals sobre la biga (figura 2.26):

$p$  = pes propi i de les càrregues mortes, i  $q$  = Sobrecàrrega d'ús.

Segons la normativa (CTE) aplicarem coeficients de seguretat a les accions segons si són càrregues permanents (pes propi) o variables (sobrecàrrega d'ús):

- Coeficient càrregues permanents:  $\gamma_G = 1.35$
- Coeficient càrregues variables:  $\gamma_Q = 1.5$

De la mateixa manera aplicarem un coeficient de minoració de la resistència de l'acer de 1.05

Segons això, la càrrega total majorada  $Q_t$  és:

$$Q_t = [(3 \text{ kN/m}^2 + 1 \text{ kN/m}^2) \times 0.70 \times 1.35] + [2 \text{ kN/m}^2 \times 0.70 \times 1.5] = 5.88 \text{ kN/m}$$

Amb aquest mètode obtindrem un moment de càlcul ( $M_d$ ), que l'anomenem així perquè intervien les càrregues majorades per un coeficient de seguretat:

$$M_d = \frac{Q_t \cdot L^2}{8} = \frac{5.88 \cdot 4.5^2}{8} = 14.88 \text{ m} \cdot \text{kN} = S_d$$

La resistència última del perfil és:

$$R_u = W_{pl} \cdot f_{yd}$$

$$f_{yd} = \frac{275}{1.05} = 261.91 \text{ N/mm}^2$$



La condició de resistència és  $S_d \leq R_u$ , llavors:

$$14.88 \cdot 10^6 \text{ mm} \cdot N \leq W_{pl} \cdot 261.9$$

$$\frac{14.88 \cdot 10^6}{261.9} \leq W_{pl}; \quad W_{pl} \geq 56.83 \cdot 10^{-3}$$

Segons la taula de perfils IPE el primer que compleix amb aquesta  $W_{pl}$ , és el IPE 120, amb  $W_{pl} = 60.73 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$

Podem veure que amb aquest últim mètode el resultat és un perfil IPE de menys secció i no per això és menys segur. Amb els altres mètodes de càlcul, ja en desús, s'obtenen estructures sobredimensionades degut a que l'aplicació de coeficients de seguretat està molt poc optimitzada.

Cal tenir en compte, però, que també s'han de complir altres Estats Límits, com el de deformabilitat (servei) que en el cas de les estructures metàl·liques acostuma a ser més restrictiu.

### 2.3.7. Mètodes probabilístics

Els mètodes de càlcul probabilístics que s'exposen en la norma internacional ISO 2394 es basen en la condició que, durant la vida útil  $T$  de l'estructura, la probabilitat d'error  $P_f$  no sobrepassi el valor de càlcul  $P_d$ , o bé l'índex de fiabilitat  $\beta$  sigui més gran que el seu valor de càlcul  $\beta_d$

$$P_f \leq P_d \quad \text{ó} \quad \beta > \beta_d$$

En el document EN 1990 la recomanació bàsica sobre l'índex de fiabilitat per a estats límit últims  $\beta_d = 3,8$  correspon a la probabilitat de fallada  $P_d = 7,2 \times 10^{-5}$ , mentre que per a estats límit de servei  $\beta_d = 1,5$  correspon a  $P_d = 6,7 \times 10^{-2}$ . Aquests valors es refereixen a una vida útil de 50 anys que és la que sol estipular per a estructures d'edificis i estructures comuns. En general, hauran de prendre valors  $\beta$  grans quan per a la verificació de la fiabilitat estructural es consideren períodes de referència més breus (p. ex. 1 o 5 anys).

Cal esmentar que, en la pràctica, els mètodes probabilístics no són encara emprats amb assiduitat. Hi ha però procediments de càlcul numèric i programari que permeten una verificació directa de la fiabilitat estructural a partir de conceptes probabilístics i de les dades experimentals disponibles. (*Holický, M. & Vrouwenvelder, T., 1990*)

A l'apartat 2.2.4 es pot veure el càlcul de l'índex de fiabilitat de l'estructura dels exemples anteriors.

### 3. Mètodes d'anàlisi de fiabilitat estructural

L'anàlisi de la fiabilitat consisteix en l'estudi de la relació entre les accions i la resistència des d'un punt de vista probabilístic, considerant els seus components com variables aleatòries. Podem fer diferents classificacions dels mètodes d'anàlisi: per nivell, per moment i ordre, per exactitud, etc.

La primera classificació és en 4 **nivells probabilistes** segons l'ús que fa cadascun d'ells de la probabilitat, (explicats a la següent Secció 3.1):

- Nivell I: Determinista
- Nivell II: Semiprobabilista
- Nivell III: Probabilista
- Nivell IV: Probabilista afegint l'anàlisi econòmica.

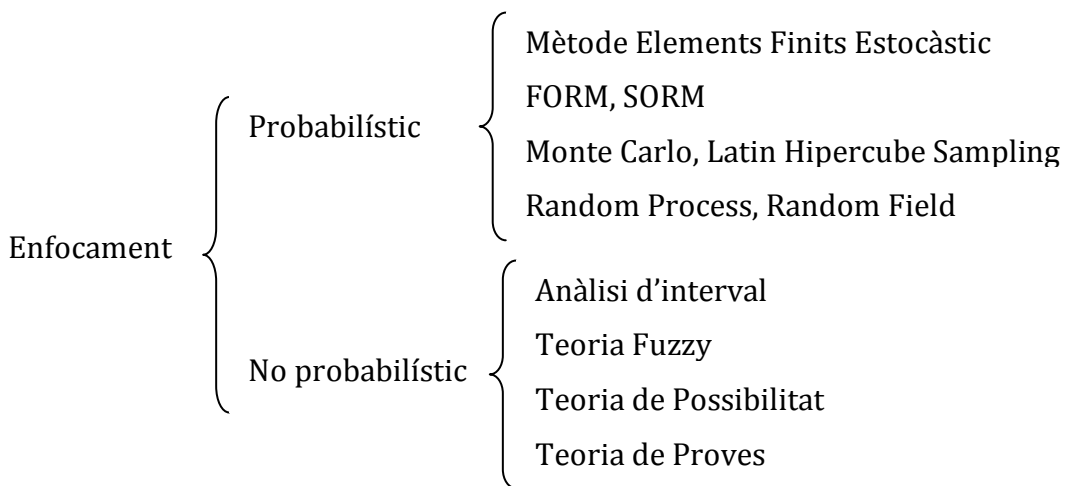
La segona classificació és per **moment i ordre**, que són els diferents mètodes aproximats:

- FOSM: First Order Second Moment
- FORM: *First Order Reliability Moment* ; SORM: *Second Order Reliability Moment*

La tercera possible classificació és per exactitud del resultat calculat:

- Mètodes aproximats: *Mean value*, FORM, etc
- Mètodes de simulació: com el Monte Carlo, Latin hipercube sampling
- Mètode de la integral directament

També els podríem dividir segons si l'**enfocament** és probabilístic o no probabilístic:



**Figura 3.1 Enfocament mètodes anàlisi. (Haldar, 1999)**

### 3.1. Classificació segons nivell probabilista

Els mètodes de mesura de la fiabilitat estructural es poden classificar en 4 nivells segons la seva complexitat, i l'ús que fan de la probabilitat:

#### 3.1.1. Mètodes deterministes (o de nivell I)

Fan servir valors nominals dels paràmetres més significatius i coeficients de seguretat (Prèviament calibrats amb mètodes probabilistes més o menys simplificats) que cobreixen la seva possible variabilitat. És el mètode utilitzat en les diferents normes i codis de caràcter semiprobabilista, com ara el CTE o l'EHE, a través dels coeficients parcials de seguretat. Els valors de les càrregues, les resistències i els coeficients de seguretat són deterministes i vénen donats principalment per l'experiència.

El coeficient de seguretat és el marge existent entre la resistència i la càrrega i es pot considerar com una mesura de la fiabilitat de l'estructura. Normalment aquests coeficients de seguretat són valors globals que s'apliquen a tota l'estructura calculada. El fet que paràmetres de disseny com ara els factors de càrrega i resistència s'obtinguin a partir de mètodes de nivell II fa que no donin un resultat optimitzat per a cada cas concret.

Idealment la mesura de la seguretat hauria de ser independent de la forma en què les resistències i les càrregues són definides però com hi ha diverses formes en que es poden definir la relació entre aquestes ens trobem amb una manca d'invariància de la mesura de seguretat (*Melchers, 1999*).

#### 3.1.2. Mètodes semi-probabilistes (o de nivell II)

En el disseny probabilístic de nivell II suposem que les variables més representatives del problema són variables aleatòries que segueixen una distribució normal.

En el càlcul estructural mitjançant aquest mètode s'utilitzen els coeficients parcials de seguretat, que s'obtenen a partir dels valors característics de les càrregues i les resistències, que coneixem com coeficients de majoració i de minoració respectivament. Aquests coeficients parcials de seguretat es determinen amb l'experiència i el calibratge mitjançant mesures de fiabilitat obtingudes amb tècniques de fiabilitat. Els valors característics així obtinguts consideren d'aquesta manera l'aleatorietat de les variables (càrregues, resistències, ...)

El nivell de seguretat s'obté a partir d'una probabilitat de fallada calculada a través de simplificacions i mètodes aproximats com el FORM (*First Order Reliability Method*) i SORM (*Second Order Reliability Method*) per tal d'aproximar el càlcul de la probabilitat

de fallada. El càlcul directe de la integral és més complex a mesura que augmenta el nombre de variables:

$$P_f = P[g(X) \leq 0] = \int_{g(x) \leq 0} f(x) dx$$

on  $f(x)$  és la funció de densitat i  $g(x)=0$  és l'equació de la funció d'estat límit i la funció  $g(x) \leq 0$  representa la zona de risc no admissible.

Aquest mètode ens dona una millor perspectiva i una informació més completa del funcionament de l'estructura calculada, ja que tenen en compte més incerteses que el mètode de nivell I. Aquest enfocament estocàstic també pot ajudar a determinar quines són les variables sobre les que hem de treballar per incrementar la seguretat i l'eficiència de l'estructura (Choi, 2006).

Aquests mètodes de fiabilitat no contempen la incorporació del temps com a variable en l'avaluació de la fiabilitat.

### 3.1.3. Mètodes probabilistes (o de nivell III)

Totes les variables que intervenen en l'avaluació de l'estructura es consideren variables aleatòries. El nivell de seguretat, i fiabilitat, es quantifica per la seva probabilitat de fallada calculada de forma "exacta" mitjançant tècniques d'integració numèrica o simulació (Monte Carlo) a partir de funcions de densitat de probabilitat molt aproximades amb la realitat.

En aquest nivell podem, d'una banda, afegir la informació derivada d'intervencions i d'errades humanes, sempre que les tinguem disponibles, i, d'altra banda, la variable temps en l'evolució de totes les funcions que hi intervenen.

### 3.1.4. Mètodes de nivell IV

Aquests mètodes tenen en compte les conseqüències avaluades com a cost, econòmic i social, de la fallada d'una estructura i el risc (conseqüències multiplicades per la probabilitat de fallada) es utilitza com a mesura de fiabilitat. D'aquesta forma es poden comparar, i fins i tot optimitzar, les diferents solucions en un entorn econòmic tenint en compte les incerteses, costos i beneficis (Clemente, 2005).

A l'hora de fer l'anàlisi del risc, o l'anàlisi cost-benefici, s'intenta maximitzar el benefici total o la utilitat de l'estructura al llarg de la seva vida útil. Una de les opcions per fer aquesta optimització és minimitzar el cost total de les inspeccions i reparacions previstes, prenent com a variables de decisió els intervals entre inspeccions, els temps d'inspecció, etc. (Celorrio, 2010).

Els nivells II, III i IV serveixen també per a calibrar, o comprovar, els nivells inferiors respectivament. En l'actualitat els mètodes III i IV es fan servir principalment en recerca o en el disseny d'estructures crítiques o singulars.

### 3.2. Classificació dels mètodes per estimar la Probabilitat de fallada

Existeixen tres classificacions possibles dels mètodes que podem fer servir per obtenir la probabilitat de fallada mitjançant l'aproximació (No són mètodes exactes).

#### 3.2.1. FOSM

*First Order Second Moment*: "Primer ordre segon moment", que es basen en una aproximació lineal de la funció d'estat límit i en considerar els dos primers moments, mitjana i variància, de les variables aleatòries que hi intervenen.

D'aquesta forma les assimilem com a variables aleatòries amb distribució normal obtenint un valor nominal, no exacte, de la probabilitat de fallada. En cas que les variables aleatòries estiguin correlacionades haurem de fer primerament una transformació a variables aleatòries independents.

#### 3.2.2. FORM, SORM

*First Order Reliability Method*: "Mètode de Fiabilitat de Primer ordre", *Second Order Reliability Method*: "Mètode de fiabilitat de segon ordre". La diferència principal entre aquest dos és que amb el FORM fem una aproximació lineal de la funció de densitat conjunta de les variables aleatòries i amb el SORM fem una aproximació quadràtica.

Aquests mètodes d'aproximació són eficients per probabilitats petites, menors que  $10^{-n}$ . Es poden utilitzar sols o en combinació amb el mètode condicional Monte Carlo. La metodologia d'aplicació d'aquests mètodes és la següent (*Lemaire, 2009*):

- 1) Selecció de les variables de disseny i modelatge de les variables aleatòries  $X_i$ , que es modelen triant la seva funció de densitat de probabilitat, o si més no la distribució marginal de cada variable i la correlació entre cada parella.
- 2) Construcció de la funció d'estat límit  $g(X_i)$  de la variable aleatòria  $X_i$  de tal manera que:
  - $g(X_i) > 0$  defineix l'èxit
  - $g(X_i) < 0$  defineix la fallada.
- 3) Definir la probabilitat de fallada:  $P_f = \text{Prob}(G(X_i) \leq 0)$
- 4) Avaluació fent servir els mètodes FORM / SORM de:
  - Índex de fiabilitat  $\beta$
  - Probabilitat de fallada  $P_f$
  - Factors de sensibilització de la fiabilitat

El mètode FORM es va desenvolupar com una extensió del FOSM, afegint a aquest la funció de densitat conjunta de les variables aleatòries que intervenen ja que disposem de més informació sobre la incertesa. (Celorrio, 2010). Desenvolupat inicialment a l'any 1956 per Freudenthal va ser ampliat amb el mètode de Hasofer i Lind al 1974, i després el mètode de Hasofer i Lind - Rackwitz i Fiessler.

Al mètode SORM la probabilitat de fallada s'estima per la superfície de fallada quadràtica obtinguda per aproximació.

### **3.3. Altres mètodes de càlcul**

A més dels mètodes aproximats (FORM, SORM) podem fer el càlcul de la fiabilitat mitjançant mètodes numèrics o de simulació. A continuació s'expliquen breument alguns dels mètodes més utilitzats.

#### **3.3.1. Mètode estocàstic d'Elements Finites**

Per tal d'obtenir més precisió amb el sistema de càlcul mitjançant els elements finits es fa necessari un enfocament de tipus probabilista on l'exactitud del mètode numèric passa a un segon terme. A més, l'anàlisi probabilista permet estudiar la fiabilitat de l'estructura, cosa que no podem fer si utilitzem un enfocament determinista convencional (*Hurtado, 2001*).

De la mateixa manera que amb els primers càlculs amb elements finits la capacitat de solució estava limitada al nombre de graus de llibertat, ara ens hem de fer la mateixa pregunta amb el nombre de variables aleatòries. El mateix succeeix amb el mètode FORM/SORM, presentats a la secció anterior, on es redueix la seva eficiència amb l'augment de les variables considerades, resultant més adient altres mètodes d'aproximació o simulació. Aquesta eficàcia està condicionada actualment amb la potència dels ordinadors, amb el que segons passin els anys aquesta augmentarà de la mateixa forma.

El desafiament avui és trobar la descomposició espectral correcta capaç de captar el màxim de variabilitat amb un nombre mínim de modes. La creació d'eines de programari promourà la seva aplicació en casos reals cada vegada més complexos (*Lemaire, 2009*).

### 3.3.2. Monte Carlo i Latin Hypercube Sampling

Aquests mètodes de simulació funcionen generant mostres aleatòries de les variables aleatòries i comprovant la probabilitat de fallada de cadascuna d'elles.

Monte Carlo és la tècnica més simple de la simulació bàsica. Cada variable aleatòria en un problema es mostreja varies vegades per a representar les característiques probabilístiques subjacents. Resoldre el problema de forma determinista per a cada realització es coneix com a cicle de simulació, assaig (*trial*) o *run*. Fent ús de molts cicles de simulació obtindrem les característiques probabilístiques del problema, augmentant la precisió a mesura que el nombre de cicles tendeix a infinit.

Fer ús de la simulació per ordinador per estudiar la presència d'incertesa en el problema és un experiment barat en comparació amb les proves de laboratori. També ajuda a avaluar diferents alternatives de disseny en la presència d'incertesa, amb l'objectiu d'identificar la solució òptima (*Choi, 2006*).

El mètode estadístic *Latin hypercube sampling* va ser desenvolupat per generar la distribució de les col·leccions plausible de valors dels paràmetres d'una distribució multidimensional. El mètode de mostreig s'aplica sovint en l'anàlisi de la incertesa. En el context del mostreig estadístic, una quadrícula que conté posicions de mostra és un *Latin square* si, i només si, no hi ha més que una mostra a cada fila i cada columna. Un *Latin hypercube* és la generalització d'aquest concepte per a un nombre arbitrari de dimensions, pel qual cada mostra és única en cada hiperplà alineat a l'eix que el conté (*wikipedia, 2010*).

### 3.3.3. Random Process, Random Field

En la teoria de probabilitats, un procés estocàstic o procés aleatori (*Random Process*), és l'equivalent a un procés determinista (o un sistema determinista). En lloc de tractar només amb una realitat possible de com podria evolucionar el procés en el temps (com és el cas, per exemple, per a les solucions d'una equació diferencial ordinària), en un procés estocàstic o aleatori hi ha certa indeterminació en el seu desenvolupament futur descrit per distribucions de probabilitat. Això vol dir que fins i tot si la condició inicial (o punt de partida) és coneguda, hi ha moltes possibilitats on el procés podria anar, però alguns camins poden ser més probables que altres.

### 3.3.4. Anàlisi d'interval

També anomenat interval aritmètic, interval matemàtic o càlcul d'interval. És un mètode desenvolupat pels matemàtics en les dècades 1950 i 1960 com una aproximació per posar límits als errors d'arrodoniment i als errors de mesurament en el càlcul matemàtic. Per això es van desenvolupar uns mètodes numèrics que produeixen

resultats fiables en aquest sentit. La base d'aquests mètodes consisteix en representar cada valor com una gama de possibilitats. En lloc de treballar amb un nombre real  $x$  amb incertesa, treballem amb els dos extrems de l'interval  $[a, b]$ , que contenen a  $x$ . És a dir,  $x$  es troba entre  $a$  i  $b$ , o podria ser un d'ells.

L'ús més comú és fer un seguiment d'errors d'arrodoniment i manejar directament en el càlcul les incerteses en el coneixement dels valors exactes dels paràmetres físics i tècnics. Aquests últims solen derivar-se dels errors de mesura i toleràncies dels components o a causa dels límits de precisió en els seus càlculs. L'aritmètica d'interval també ajuda a trobar solucions fiables i amb garanties en equacions i problemes d'optimització.

### **3.3.5. Teoria Fuzzy Logic**

La teoria Fuzzy Logic o de la lògica difusa o borrosa és una extensió de la Lògica multivaluada, que a més està relacionada i fonamentada en la teoria de conjunts difusos. Segons aquesta teoria, serà una funció de transferència (que prendrà qualsevol dels valors reals compresos en l'interval  $[0,1]$ ) la que determini el grau de pertinença d'un element a un conjunt. La idea bàsica per a l'ús de la lògica difusa és l'aproximació al pensament humà en el qual es durà a terme una valoració ponderada sobre la base de múltiples variables mesurades de forma difusa.

### **3.3.6. Teoria de Possibilitat**

Aquesta va ser desenvolupada per Lotfi Zadeh al 1978 i té les seves arrels en les altres investigacions de Zadeh: La teoria dels conjunts difusos i la lògica difusa. És una teoria matemàtica per fer front a certs tipus d'incertesa i és una alternativa a la teoria de probabilitats.



#### 4. La fiabilitat a les normatives.

El paper dels codis de disseny és establir els requisits necessaris per garantir un nivell acceptable de fiabilitat de les estructures. La limitació que tenen els codis o les normatives és que poden ser molt conservadores, o que no s'adeqüin perfectament a l'ambient particular. Com ja hem vist abans, la fiabilitat està estretament lligada a la probabilitat de fallada. El nivell acceptable de fiabilitat depèn de cada indústria, país, valoració personal, etc. (*Xila, 2007*). A continuació podem veure alguns exemples de probabilitat de fallada:

- Vol:  $P_f = 10^{-6}$
- Cursa de cotxes:  $P_f = 3 \cdot 10^{-4}$
- Reactor d'energia nuclear:  $P_f =$  des de  $10^{-7}$  fins  $10^{-22}$

La humanitat ha caminat cap a uns codis basats en la recerca científica, que es basen en l'experiència acumulada i en la construcció dels models projectats, donant als enginyers l'opció de tenir en compte els riscos (*Lemaire, 2009*).

El calculista que dissenya una estructura té llibertat per triar el model estructural, disseny, dimensions, tipus de connexions, els suports i les condicions de càrrega, però una vegada ha pres aquestes decisions el disseny en detall el fa segons els codis corresponents.

L'objectiu del disseny estructural es pot prendre raonadament com una maximització de la utilitat de tota l'estructura, donades les dades de disponibilitat de materials i mà d'obra. Hi ha dos aspectes complementaris del disseny que s'han de tenir en compte:

- a) L'optimització de la utilitat total esperada de l'estructura, pel dissenyador.
- b) L'optimització del codi de disseny estructural, pel comitè que l'escriu.

Respecte al punt b):

- Regles de seguretat en la teoria dels codis.
- Els formats probables pels anomenats codis de disseny de l'estat límit.
- La relació d'aquests codis amb els conceptes de fiabilitat.

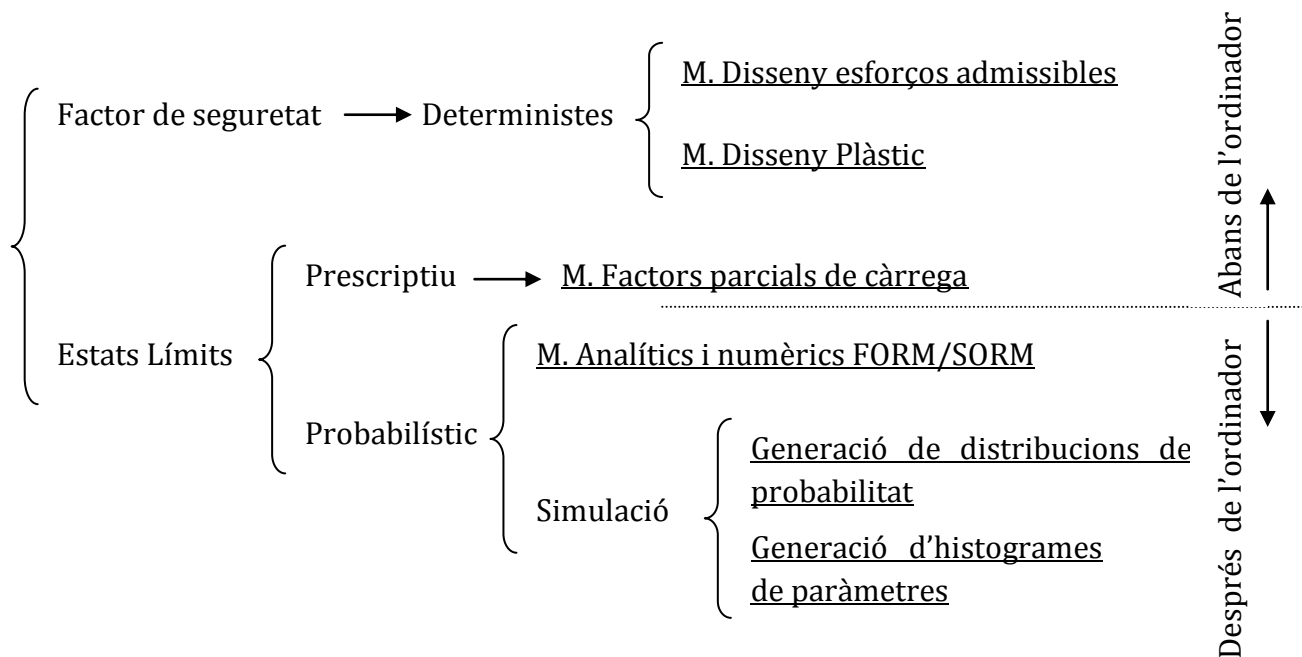
Aspectes fonamentals de l'escriptura dels codis ha estat discutit per Ditlevsen en 1997 (*Melchers, 1999*).

Un codi de disseny estructural es pot veure com una eina predictiva, en el sentit en que el dissenyador, seguint els requeriments del codi, pot esperar que l'estructura resultant sigui suficient segura i útil durant el període de vida útil. No obstant això, en l'etapa de disseny, algunes consideracions no són conegudes amb certesa i només es poden predir. La forma com un codi està estructurat per adaptar-se a aquestes

incerteses poden afectar la utilitat esperada de qualsevol estructura dissenyada fent-lo servir.

El grau d'optimització de la utilitat esperada d'un codi pot dependre de l'interès de les persones afectades, com ara el constructor, el propietari, l'usuari eventual i les autoritats reguladores. Són les autoritats reguladores juntament amb els enginyers d'estructures els que donen més importància a la seguretat estructural, encara que aspectes com el servei o l'economia són també importants (*Melchers, 1999*).

En la següent figura 4.1 es presenten les diferents alternatives pel desenvolupament dels codis de disseny amb base a les característiques de l'anàlisi de fiabilitat (*Marek, 2001*).



**Figura 4.1 Mètodes d'anàlisi de la fiabilitat (Marek et al, 2001)**

A Espanya la construcció d'edificacions està regulada pel Codi Tècnic de l'Edificació, o **CTE**. Aquest Codi es compon de diferents llibres on es tracten totes les matèries que intervenen en el disseny i construcció d'un edifici. Dintre del llibre Document Bàsic Seguretat Estructural (**DB-SE**) trobem l'annex C titulat "*Principios de los métodos probabilistas explícito e implícito*" on es tracten aquests temes.

#### 4.1. CTE DB-SE, Annex C

L'annex C del Codi Tècnic de l'Edificació tracta sobre els principis dels mètodes probabilistes explícits i implícits. El contingut del mateix és de caràcter informatiu i té dos objectius:

- El Recull de les bases en què es fonamenten Els Capítols 3, 4 i 5 de DB-SE.
- La Introducció d'algunes Recomanacions relatives a l'aplicació dels mètodes probabilistes explícits.

És aplicable per a:

- Les verificacions relatives a la capacitat portant (estats límits últims)
- La verificació de l'aptitud al servei als casos irreversibles.

No és aplicable:

- En general, als estats límit de servei reversibles.

L'aplicació dels mètodes probabilistes explícits els podem utilitzar per a la verificació de qualsevol problema que es pugui descriure a través de relacions matemàtiques sempre que es pugui identificar el conjunt dels corresponents esdeveniments aleatoris. Podem dividir en dos grups les principals aplicacions d'aquests mètodes:

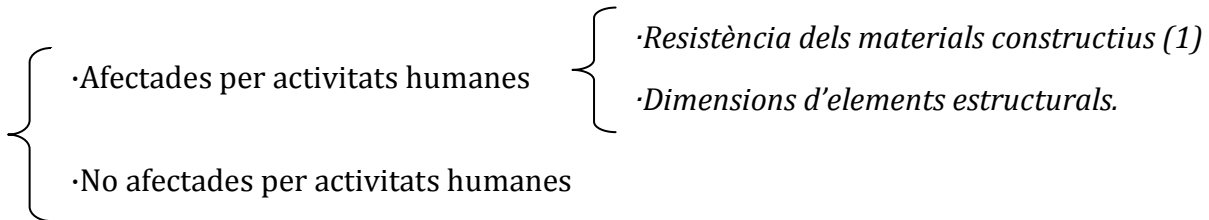
- la calibració de models probabilistes implícits (Per exemple el calibratge dels coeficients parcials);
- l'aplicació directa per a l'adopció de decisions relacionades amb les prestacions de les estructures (per exemple pel dimensionat d'estructures noves als casos en què els mètodes implícits resultin inadequats, o per la avaluació estructural d'edificis existents).

A l'apartat C.2 es defineixen les incerteses associades amb les variables bàsiques, on es poden distingir tres tipus d'incerteses, (veure també figura 4.2):

- Variabilitat aleatòria inherent al model, que poden estar o no afectades per activitats humanes. De l'home depèn, per exemple, les dimensions i la resistència dels elements estructurals en la seva fabricació. Aquesta mena d'incerteses es poden reduir mitjançant mètodes de producció més avançades o mètodes de control adients.
- Incerteses degudes a la manca de coneixements que tant poden ser dels models utilitzats, com per exemple els models de les accions i els seus efectes (velocitat del vent, càrrega de neu..) o els models de resistència, com ara de les que depenen de l'evolució futura de certs paràmetres, com per exemple l'evolució de les sobrecàrregues.
- Incerteses estadístiques, associades amb l'avaluació estadística dels resultats dels assaigs, mesures o altres observacions. Alguns exemples d'aquestes incerteses són: manca d'identificació i de distinció entre diferents poblacions estadístiques; nombre limitat de resultats que condueix a incerteses en l'obtenció dels paràmetres estadístics (per exemple del valor mitjà o de la desviació típica); no consideració de les variacions sistemàtiques de les variables analitzades (per

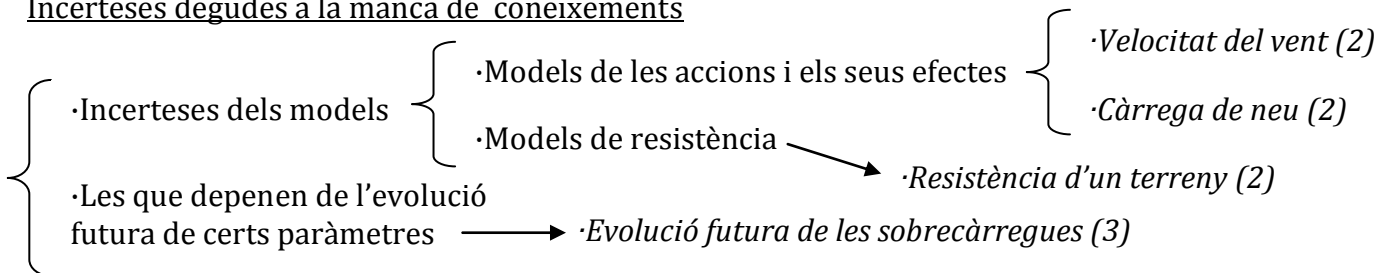
exemple de paràmetres climàtics); una extrapolació excessiva de la informació estadística; no consideració de possibles correlacions; l'ús de distribucions estadístiques per a la descripció d'incerteses l'origen del qual és només en part és estadístic.

### Variabilitat aleatòria inherent al model



(1) Aquestes incerteses es poden reduir mitjançant mètodes de producció més avançades o mètodes de controls adients

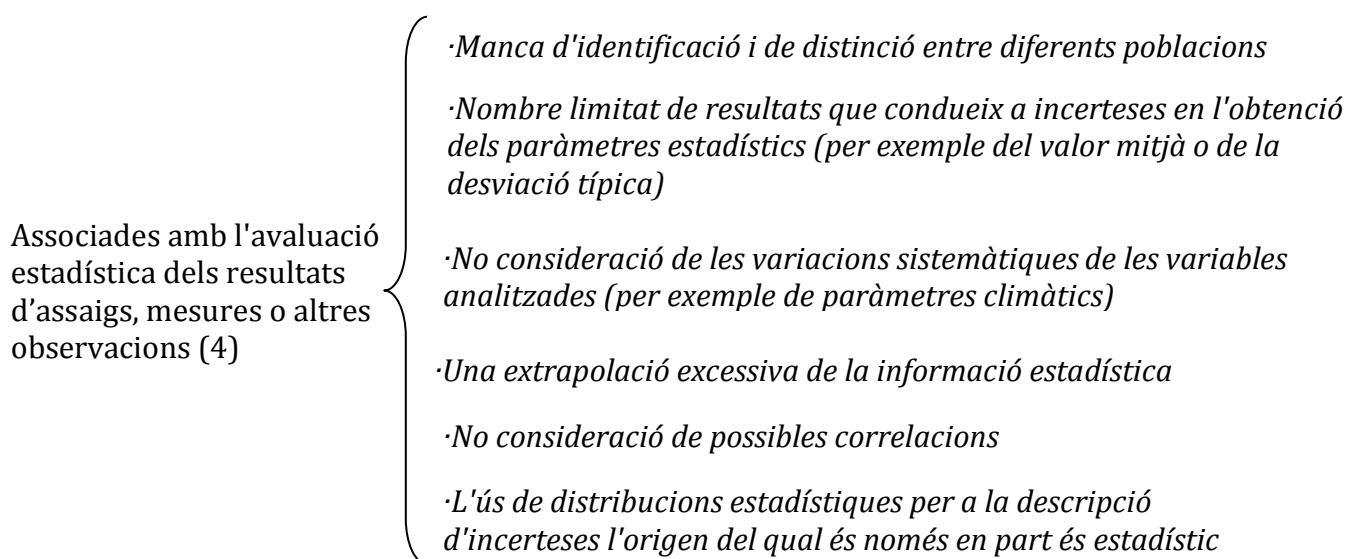
### Incerteses degudes a la manca de coneixements



(2) Aquestes incerteses es poden reduir mitjançant la millora dels coneixements mitjançant assajos o investigacions teòriques

(3) Poca possibilitat de reducció d'aquestes incerteses.

### Incerteses estadístiques.



(4) Es poden reduir a través d'un major nombre d'assajos o observacions.

**Figura 4.2 Font de les incerteses**

L'obtenció de les dades numèriques es pot fer per diferents vies o combinant dades obtingudes de diverses d'elles:

- a) Mesuraments o observacions \*
- b) Anàlisi \*
- c) Adopció de decisions \*\*

a) i b): En aquests casos el procediment inclourà una anàlisi estadística de les dades i els resultats es representaran en termes estadístics.

c): No és possible normalment una representació directa en termes estadístics, però a efectes de l'aplicació dels mètodes probabilistes també assignarem a aquestes variables paràmetres estadístics.

Variabels bàsiques que tenen en compte les incerteses es caracteritzaran mitjançant paràmetres com ara:

- Valor mitjà
- Desviació típica
- Correlacions amb altres variables
- Tipus de distribució estadística

| <b>Dades</b>                      | <b>Funció de distribució estadística</b>       |
|-----------------------------------|--|
| Accions permanents                | Normal *                                       |
| Accions variables                 | Log-normal, Weibull, Gamma o de valors extrems |
| Propietats materials i dimensions | Normal o Log-normal                            |

**Taula 4.1 Selecció de les distribucions estadístiques**

\*: En cas que la possibilitat que es produeixin valors negatius no resulti contradictòria amb altres hipòtesis i puguin donar resultats erronis; si és aquest el cas s'agafaran funcions Log-normal, Weibull, Gamma o de valors extrems.

A l'apartat 4.1 trobem les següents seccions:

Secció 4.1.1 s'exposen els nivells de fiabilitat:

Seguretat de les persones

Optimització econòmica

Valors numèrics : (explicat parcialment a l'apartat 1.2.2 d'aquest PFC)

Secció 4.1.2 es determina la probabilitat de fallada:

Problemes variables amb el temps

Transformació de problemes variables en el temps en invariables en el temps.

Secció 4.1.3 s'exposen els mètodes basats en la determinació dels valors de càlcul:

FORM

Factors de sensibilitat

Secció 4.1.4 s'exposen el format dels coeficients parcials:

Basats en valors de càlcul

Coefficients parcials calibrats

A l'apartat 4.2 trobem l'optimització econòmica, on s'explica que el nivell de fiabilitat requerit es pot determinar mitjançant un equilibri entre les conseqüències de la fallada estructural d'un edifici i el cost de les mesures de protecció i seguretat. Es facilita una fórmula per la optimització, que es basa en minimitzar el cost total acumulat durant el període en que estarà l'estructura en servei. En aquest cost total intervenen:

|   |   |
|---|---|
| { | Cost del projecte i de l'execució                   |
|   | Cost previst pel manteniment, inspecció i demolició |
|   | Cost de la fallada                                  |
|   | Probabilitat de fallada                             |

A l'apartat 4.3 parla del Valors numèrics. Aquests valors són l'índex de fiabilitat i la probabilitat de fallada. Es mostra una taula on es relacionen els dos. Aquesta taula es pot veure a aquesta memòria a la taula 2.2.

A la Secció 4.3.3 es mostra una taula de valors nominals, referits a tot el període de servei, per l'índex de fiabilitat requerit:

| Cost relatiu per incrementar la fiabilitat | Conseqüències d'una fallada estructural |         |           |       |
|--|---|---------|-----------|-------|
|  | Menyspreables                           | Petites | Moderades | Grans |
| Elevat                                     | 0                                       | 1.5     | 2.3       | 3.1   |
| Moderat                                    | 1.3                                     | 2.3     | 3.1       | 3.8   |
| Baix                                       | 2.3                                     | 3.1     | 3.8       | 4.3   |

Taula 4.2 Valors nominals, referits a tot el període de servei, per l'índex de fiabilitat requerit

Els valors d'aquesta taula es dedueixen aplicant els mètodes dels valors de càlcul que s'expliquen després a l'apartat C.6 (mètode FORM). És interessant veure quines són les hipòtesis per les funcions de distribució dels models probabilistes:

| Hipòtesis             | Funcions de distribució |
|-----------------------|-------------------------|
| Models de resistència | lognormal o Weibull     |
| Accions permanents    | normal                  |
| Accions variables     | Gumbel                  |

Taula 4.3 Hipòtesis per les funcions de distribució dels models probabilistes

A l'apartat 4.3.4 es donen els valors recomanats per l'índex de fiabilitat requerit, referits a tot el període en servei de l'estructura:

|                                      | $\beta$       |
|--------------------------------------|---------------|
| Estats límit de servei reversibles   | 0             |
| Estats límit de servei irreversibles | 1.5           |
| Fatiga                               | 2.3 a 3.1 *   |
| Estats límit últims                  | 3.1; 3.8; 4.3 |

Taula 4.4 valors recomanats per l'índex de fiabilitat requerit

\*: segons les possibilitats d'inspecció

A l'apartat C.5 s'explica la determinació de probabilitats de fallada, la problemàtica general, els problemes invariants en el temps i com transformar-los en problemes variables en el temps.

En l'apartat C.6 s'expliquen els mètodes basats en la determinació dels valors de càlcul: el mètode aproximat FORM i els factors de sensibilitat.

I per acabar, en l'apartat C.7 parla del format dels coeficients parcials, que és el mètode de càlcul d'estructures més habitual. A la Secció 7.2 s'introdueixen els coeficients parcials calibrats que consisteix en la deducció de coeficients parcials per tal de que la fiabilitat estructural resultant es desviï lo menys possible de la fiabilitat requerida.

## 4.2. EHE-08

Amb la nova revisió de la "*Instrucción de hormigón estructural*" EHE, que va ser aprovada pel Real Decret del 18 de juliol 2008, s'adopten els formats de seguretat similars als dels Eurocodis i el seu tractament de la durabilitat, introduint criteris per a la vida útil.

La instrucció té per objecte regular el projecte, execució i control de les estructures de formigó, tant en obres d'edificació com d'enginyeria civil, a fi d'aconseguir l'adequada seguretat de les mateixes, preservant la de les construccions que en elles s'hi sustenten i la dels usuaris que les utilitzen.

Els punts relacionats amb la fiabilitat estructural són els següents:

- Entrada en vigor del marcatge CE pels primers casos de productes de construcció, en l'àmbit de la Directiva 89/106/CEE del Consell, de 21 de desembre de 1988, relativa a l'aproximació de les disposicions legals, reglamentàries i administratives dels Estats membres sobre productes de construcció.
- La finalització dels treballs desenvolupats pel Comitè Europeu de Normalització (CEN) en relació amb els Eurocodis estructurals i, en particular, amb la norma europea EN 1992.01.01 "Eurocodi 2. Projecte d'estructures de formigó. Part 1.1. Regles generals i edificació".
- Al punt 5.1.1 s'indiquen les exigències que s'han de satisfer en relació a la seguretat estructural: les estructures s'han de projectar, construir, controlar i mantenir de manera que es compleixin uns nivells mínims de fiabilitat per a cadascuna de les exigències que s'estableixen en els apartats següents, d'acord amb el sistema de seguretat recollit en el grup de normes europees EN 1990 a A 1999 "Eurocodis Estructurals". S'entén que el compliment d'aquesta Instrucció, complementada per les corresponents reglamentacions específiques relatives a accions, és suficient per garantir la satisfacció d'aquest requisit de seguretat estructural.

- Al punt 5.1.1.1 es tracta l'exigència de resistència i estabilitat: La resistència i l'estabilitat de l'estructura seran les adequades perquè no es generin riscos inadmissibles com a conseqüència de les accions i influències previsibles, tant durant la seva fase d'execució com durant el seu ús, mantenint durant la seva vida útil prevista. A més, qualsevol esdeveniment extraordinari no s'haurà de produir conseqüències desproporcionades respecte a la causa original. El nivell de fiabilitat que assegureu-vos en les estructures de formigó vindrà definit per la seva índex de fiabilitat,  $\beta_{50}$ , per a un període de referència de 50 anys, que en el cas general, no haurà de ser inferior a 3,8. En el cas d'estructures singulars o d'estructures de poca importància, la Propietat podrà adoptar un índex diferent. Els procediments inclosos en aquesta Instrucció mitjançant la comprovació dels Estats Límit Últims, juntament amb la resta de criteris relatius a execució i control, permeten satisfer aquesta exigència.
- Harmonització general dels procediments de càlcul en relació amb els Eurocodis estructurals i, en particular, amb la norma europea EN 1992.01.01 "Eurocodi 2. Projecte d'estructures de formigó. Part 1-1. Regles generals i regles per a edificació"
- Als projectes d'estructures es fa obligatori un pla de manteniment i revisió de les mateixes, que incideix directament en la seguretat i vida útil.

Com es pot veure, es tracta d'un codi basat en prestacions, amb els requisits: Seguretat i Funcionalitat, Seguretat en cas d'incendi i Seguretat Mediambiental.

Normalment, a l'hora d'encarregar un projecte, la propietat ha de definir la vida útil de la construcció (indirectament la de l'estructura). Es facilita una taula (4.5) on es pot veure que per a edificació es preveu una vida útil de 50 anys:

| <b>Tipus d'estructura</b>   | <b>Vida útil nominal</b> |
|---|--------------------------|
| Estructures de caràcter temporal (2)  | Entre 3 i 10 anys        |
| Elements reemplaçables que no formen part de l'estructura principal (per exemple, baranes, suports de canonades)  | Entre 10 y 25 anys       |
| Edificis (o instal·lacions) agrícoles o industrials i obres marítimes   | Entre 15 i 50 anys       |
| Edificis d'habitatges o oficines, ponts o obres de pas de longitud total inferior a 10 metres i estructures d'enginyeria civil (excepte obres marítimes) de repercussió econòmica baixa o mitjana | 50 anys                  |
| Edificis de caràcter monumental o d'importància especial  | 100 anys                 |
| Ponts de longitud total igual o superior a 10 metres i altres estructures d'enginyeria civil de repercussió econòmica alta  | 100 anys                 |

**Taula 4.5 Vida útil nominal dels diferents tipus d'estructura EHE-08**

(2) En funció del propòsit de l'estructura (exposició temporal, etc.). En cap cas es consideraran com a estructures de caràcter temporal aquelles estructures de vida útil nominal superior a 10 anys.



Quan una estructura estigui constituïda per diferents parts, podrà adoptar per a tals parts diferents valors de vida útil, sempre en funció del tipus i característiques de la construcció de les mateixes.

### 4.3. Eurocodis

A Europa, la Comissió Europea va encarregar al Comitè Europeu de Normalització (CEN) el desenvolupament dels Eurocodis estructurals, que són un conjunt de normes europees de caràcter voluntari, que parteixen de les normatives actuals d'estructures de formigó dels diferents països membres. Els Eurocodis són normes tècniques harmonitzades pel disseny de la construcció a tot Europa. L'objectiu de la seva preparació, de 1975 a 2005, va ser l'eliminació d'obstacles tècnics al comerç i l'harmonització de les especificacions tècniques per a la construcció. Al 1990 la Comissió va encarregar al CEN el seu desenvolupament i aquest va crear el Comitè Tècnic CEN/TC150 "Eurocódigos Estructurales". El seguiment i vigilància d'aquests va recaure sobre el Comitè Permanent de la Directiva 89/106/CEE, de Productos de Construcción. Per al seguiment a nivell nacional, l'organisme espanyol de normalització membre del CEN, (AENOR), va crear el AEN/CTN140 com a Comitè mirall del CEN/TC250.

L'equivalent dels Eurocodis en la normativa espanyola són les UNE-ENV (normes experimentals) elaborades per encàrrec de la Comissió Europea pel CEN, com a resultat d'un acord marc entre ambdues institucions.

Els Eurocodis es van publicar a mitjans del 2007. La Unió Europea va dictaminar que a l'any 2010 els diferents països europeus no podrien tenir normes en vigor que entressin en conflicte amb els Eurocodis. La vigent actualització de la norma espanyola EHE i la redacció del CTE s'han basat, per aquest motiu, en l'Eurocodi. El text dels Eurocodis és comú, si bé es permet que cada país membre pugui definir el valor dels paràmetres que estimi més adequats per raons geogràfiques, climàtiques, etc. a través dels respectius Documents Nacionals d'Aplicació (DNA).

És important remarcar que tots els Eurocodis segueixen la filosofia dels Estats Límit i el mètode dels factors parcials en el seu desenvolupament.

Tots tenen en comú la designació UNE EN **199X-Y-Z** sent "X" el nombre assignat inicialment al Eurocodi corresponent i "Y" i "Z" les diferents parts previstes. Un exemple d'aquesta codificació és: *"EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of Concrete Structures-Part 1: General Rules and rules for buildings"*.

A la següent figura 4.3 es pot veure la relació entre els diferents Eurocodis:

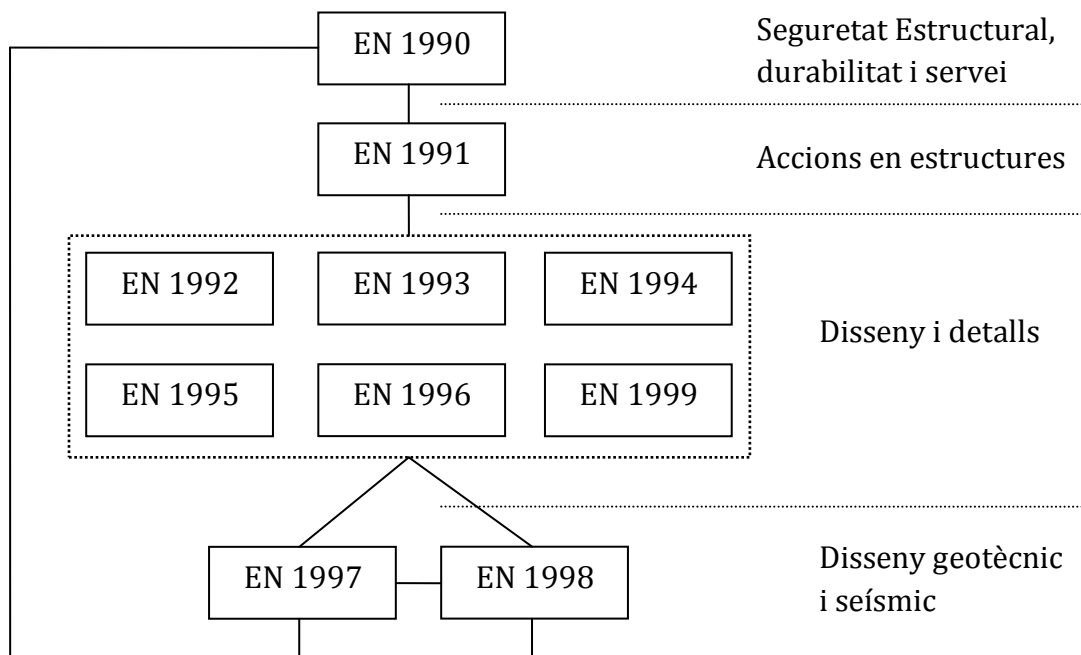


Figura 4.3 Relació entre els diferents Eurocodis (London, 2007).

La majoria de les definicions contingudes en els Eurocodis es deriven de les normes ISO 2394R, ISO 3898R, i ISO 8930R. A més s'ha de fer referència a la norma EN 1990, que proporciona una llista bàsica de termes i definicions que són aplicables a les normes EN 1990 fins la EN 1999.

És important tenir en compte les definicions dels següents termes ja que poden variar de les indicades a les normatives d'aplicació de cada país:

- **Acció**, (*Action*) és una càrrega o una deformació imposada, com per exemple els efectes de temperatura o l'assentament.
- **Efectes de les accions**, (*Effects of Actions or Action effects*) són els moments interns i les forces, els moments flectors, esforços tallants i les deformacions causades per les accions.
- **Resistència** (*Strength*) és una propietat mecànica d'un material, en unitats d'estrès.
- **Tallant** (*Resistance*) és una propietat mecànica d'una secció transversal d'un membre o estructura.

A continuació comentarem els Eurocodis que estan més relacionats amb la fiabilitat estructural a l'edificació.

- **Eurocodi 0:** Bases del disseny estructural (EN 1990).
- **Eurocodi 2:** Projecte d'estructures de formigó (EN 1992).
- **Eurocodi 8:** Disseny d'estructures per a la resistència de terratrèmols (EN 1998).

### 4.3.1. Eurocode 0: Bases del disseny estructural (EN 1990)

L'Eurocodi 0, o EN 1990, és el document central en el conjunt dels Eurocodis que estableix les bases per a tots els altres: del EN 1991 al EN 1999. La EN 1990, va ser ratificada pels NSBs el 29/11/2001 i publicada el 24/04/2002.

En aquest Eurocodi es descriuen les bases i principis generals pel disseny estructural i verificació dels edificis i obres d'enginyeria civil. Fa referència als aspectes geotècnics, els principis i requisits per a la seguretat i funcionalitat de les estructures i orienta sobre els problemes relacionats amb la fiabilitat estructural en totes les circumstàncies, inclosos els incendis i sismes. Tots els altres Eurocodis s'han de fer servir sempre conjuntament amb aquest.

Es permet l'ús d'altres regles de disseny alternatives a les indicades a la norma EN-1990, sempre que es demostrï que aquestes, d'acord amb els principis pertinents, siguin com a mínim equivalents pel que fa a la resistència, utilitat i durabilitat de l'estructura. És a dir, hauran de ser equivalents al que s'aconseguiria mitjançant l'Eurocodi.

Els continguts es divideixen en diferents seccions:

Secció 1 : Generalitats

Secció 2 : Requisits

Secció 3 : Principis dels estats límit

Secció 4 : Variables bàsiques

Secció 5 : Anàlisi estructural i disseny assistit per proves

Secció 6 : Verificació pel mètode dels factors parcials

Annex A(n);(N): Aplicació per edificis (1); ponts (2)

Annex B (I) : Gestió de fiabilitat estructural per a treballs de construcció

Annex C (I) : Bases pel disseny amb factors parcials i anàlisi de fiabilitat

Annex D (I) : Disseny assistit per proves

Els requisits fonamentals per a la fiabilitat dels treballs de construcció inclouen la **Seguretat estructural, capacitat de servei, robustesa i foc**:

- **Seguretat estructural:** Una estructura ha de ser dissenyada i executada de manera que, durant la seva vida prevista amb els graus adequats de fiabilitat, i d'una forma econòmica, pugui sostenir totes les accions que podrien donar-se durant l'execució i ús de la mateixa. Seguretat de les persones, de l'estructura i el contingut.
- **Servei:** Una estructura ha de ser dissenyada i executada de manera que, durant la seva vida prevista amb graus adequats de fiabilitat i, en una forma econòmica, continuïn sent aptes per a l'ús al qual se li requereix. Funcionament, de la comoditat i l'aspecte de l'estructura.

- **Robustesa:** Una estructura ha de ser dissenyada i executada de manera que no pateixi danys per esdeveniments com ara explosions, impactes i conseqüències dels errors humans. (Per a cada projecte individual, i amb l'acord entre el client i l'autoritat pertinent)
- **Foc:** en cas de foc, la resistència de l'estructura haurà de ser adequada per al període de temps establert.

Pel requisit de robustesa la EN 1990 dóna uns principis bàsics per limitar el dany potencial, mitjançant les següents consideracions:

- Evitar, eliminar o reduir els riscos a què l'estructura pot ser objecte;
- Selecció d'una forma estructural que tingui una baixa sensibilitat als perills considerats;
- Selecció d'una forma estructural i un disseny que pugui sobreviure adequadament l'eliminació accidental d'un membre individual o d'una part limitada de l'estructura, o l'ocurrència de danys localitzats acceptables;
- Evitar, en la mesura del possible, els sistemes estructurals que poden ensorrar-se sense previ avís;
- Vincular els elements estructurals entre ells.

Altres requisits són també la diferenciació de la Fiabilitat, el disseny de la vida útil, la durabilitat i l'assegurança de la Qualitat:

- **Diferenciació de la Fiabilitat:** EN 1990 proporciona una guia per a l'obtenció de diferents nivells de fiabilitat. Un nivell de fiabilitat adequat s'obté mitjançant el disseny i execució d'acord amb els Eurocodis 1 a 9. La selecció dels nivells de fiabilitat per a una estructura en particular ha de tenir en compte factors rellevants com ara: La possible causa i/o manera d'arribar a un estat límit, les possibles conseqüències d'una fallada en pèrdues de vides humanes, danys a les persones o pèrdues econòmiques, la percepció pública de la fallada, i les despeses i procediments necessaris per reduir el risc de fallada.
- **Disseny de la vida útil:** La vida útil de disseny és el període en el qual l'estructura es farà servir d'acord amb l'ús i manteniment previstos sense que sigui necessària una reparació important. La norma recomana uns temps de vida útil de 50 anys pels edificis i 100 anys pels ponts.
- **Durabilitat:** L'estructura ha de ser dissenyada de tal manera que el deteriorament no ha de perjudicar la durabilitat i el rendiment de l'estructura tenint en compte el nivell de manteniment previst.
- **Assegurança de la Qualitat:** Per tal d'obtenir una estructura que es correspon als requisits i les suposicions fetes al seu disseny.

Al Capítol 2 es dona un llistat amb les classes de les conseqüències de fallada que es poden donar al triar cada nivell de fiabilitat:

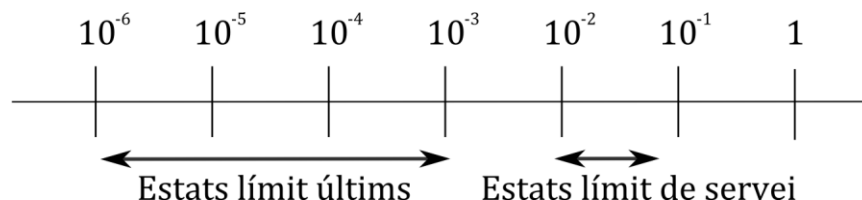
| Classes de conseqüències | Descripció   | Exemples d'edificis i treballs d'enginyeria civil  |
|--------------------------|--|--|
| CC3                      | Conseqüència <b>alta</b> de la pèrdua de vides humanes o conseqüències econòmiques, socials o del medi ambient molt grans.       | Tribunes, ponts, edificis públics on les conseqüències d'una fallada són altes.                    |
| CC2                      | Conseqüència <b>mitjana</b> de la pèrdua de vides humanes o conseqüències econòmiques, socials o del medi ambient considerables. | Edificis residencials i d'oficines, edificis públics on les conseqüències d'una fallada són altes. |
| CC1                      | Conseqüència <b>baixa</b> de la pèrdua de vides humanes o conseqüències econòmiques, socials o del medi ambient petites.         | Edificis agraris on la gent no entra normalment, hivernacles.                                      |

**Taula 4.6 Classes de conseqüències segons EN 1990**

A l'annex B es donen les següents eines per a la gestió de les conseqüències de fallada segons cada cas:

- diferenciació dels valors de  $\beta$  (índex de fiabilitat);
- modificació dels factors parcials;
- diferenciació de la supervisió del disseny
- inspeccions durant l'execució

A continuació es pot veure la relació entre els estats límits i les probabilitats de fallada associades. Per exemple, un índex de fiabilitat  $\beta$  igual a 3,8 el trobaríem en la probabilitat  $7,2 \cdot 10^{-5}$  (període de referència 50 anys) als estats límit últims, i un índex de fiabilitat  $\beta$  igual a 1,5 el trobaríem en la probabilitat  $0,5 \cdot 10^{-1}$  (període de referència 50 anys) als estats límit de servei:



**Figura 4.4 Probabilitat de fallada associada als estats límit**

A la [taula 2.2](#) d'aquesta memòria es poden veure altres relacions entre la  $P_f$  i  $\beta$ .

La norma també dona uns indicadors de vida útil de disseny segons cada tipus d'estructura en particular, molt similar a la que hi ha a la norma espanyola EHE 08:

| Categoria de vida útil de disseny | Indicatiu de la Vida útil de disseny (anys) | Exemples   |
|-----------------------------------|---|--|
| 1                                 | 10  | Estructures temporals (no reutilitzables)  |
| 2                                 | 10 - 25                                     | Parts estructurals reemplaçables   |
| 3                                 | 15 - 30                                     | Estructures agràries i similars  |
| 4                                 | 50  | Estructures d'edificis i d'altres comuns   |
| 5                                 | 100   | Estructures d'edificis monumentals, ponts de ferrocarril i d'altres estructures civils |

Taula 4.7 Categories de vida útil segons EN 1990

#### 4.3.2. Eurocodi 2: Projecte d'estructures de formigó. (EN 1992)

La norma EN 1992-1-1 (EN 1992-1-1:2004 - EN 1992-1-1:2004/AC:2008) enuncia les normes generals per a totes les estructures i normes generals per al disseny d'edificis de formigó armat, reforçat i pretensat. Estan inclosos el formigó de pes normal i el formigó lleuger. Part 1-1: *General rules and rules for buildings*. Regles generals i per a l'edificació.

Les seccions en la norma EN 1992-1-1 expliquen els fonaments dels diferents fenòmens, com la flexió, el tallant o l'enllaç, en lloc dels tipus de membres, com per exemple les bigues, lloses i columnes.

La norma EN 1992 no dona les clàusules independents dels materials necessàries per al disseny. Aquests només s'inclouen en la norma EN 1990, per això és tant important que la EN 1990 sigui utilitzada amb la resta dels Eurocodis ja que proporciona la informació per als factors de seguretat de les accions i la combinació dels efectes de les accions. Això és necessari per a la verificació dels estats límit de servei i últim.

Dintre d'aquesta norma l'ús de la probabilitat es fa servir en la definició dels valors representatius de les accions. Aquests valors són necessaris per a dissenyar diferents situacions i són: valor combinació, valor freqüent i el valor permanent ( $\psi_0$ ,  $\psi_1$  i  $\psi_2$ ). Aquests valors estan definits d'igual manera a la normativa espanyola CTE.

### 4.3.3. Eurocodi 8: Disseny d'estructures per a la resistència de terratrèmols (EN 1998). (*Design of structures for earthquake resistance*)

L'Eurocodi 8 inclou les disposicions per al disseny d'estructures de formigó i metàl·liques per a la resistència d'aquestes als terratrèmols, incloent-hi la seva fonamentació. Aquest Eurocodi està organitzat en els següents apartats:

- **EN1998-1:** Regles Generals, accions sísmiques i regles per a edificació.
- **EN1998-3:** Reforç i reparació d'edificis.
- **EN1998-5:** Fonamentacions, dipòsits i aspectes geotècnics.

Inclou les disposicions complementàries necessàries per al disseny estructural d'edificis i obres d'enginyeria civil que s'hagin de construir en regions sísmiques on el risc per a les vides humanes o el risc per danys estructurals han de ser reduïts. És a dir, els requisits generals i normes d'avaluació de les accions sísmiques i les combinacions amb altres accions. Això ho fa mitjançant normes generals per al disseny sismoresistent d'edificis i normes específiques per als edificis i elements construïts amb cada un dels materials estructurals.

Aquest Eurocodi caracteritza l'efecte de les incerteses en el modelatge estructural en els anomenats factors de confiança, o *Confidence Factors* (CF). Aquests s'apliquen en els valors mitjans de les propietats dels materials. No obstant això, l'efecte de l'aplicació dels factors de confiança en la fiabilitat estructural no s'indica explícitament.

A més a l'hora d'avaluar les edificacions existents existeix massa conservadorisme ja que aplica coeficients inferiors a la unitat als factors de confiança del valor mitjà de les propietats del material. Aquests factors de confiança es determinen en funció dels nivells de coneixement, *knowledge levels* (KL). Els nivells de coneixement es determinen en base a la quantitat d'assaigs i inspeccions efectuats a l'edifici existent. Això deixa massa a l'interpretació personal de cadascú, ja que les divisions dels KL són: limitada, extensa i global, sense entrar en profunditat en el significat de cadascuna.

Un enfocament alternatiu apareix en les directrius del SAC-FEMA, (*Seismic Design Criteria Steel Project, de la Federal Emergency Management Agency*) que considera la incertesa de l'efecte de moviment del sòl i les incerteses de modelatge estructural en el rendiment global de l'estructura, en un format tancat d'anàlisi del control de seguretat (*Fatemeh, 2009*).

### 4.4. ISO 2394

Aquesta norma ISO (*General principles on reliability for structures*) traduït: "Principis generals sobre la fiabilitat de les estructures" va ser creada per la *International Standard Organization* vol servir com a base per a les comissions responsables d'elaborar els codis i normes per a les estructures en general.

La fiabilitat es considera en relació amb el desenvolupament de l'estructura a través del seu temps estimat de vida dissenyat, i vol ser un estàndard per a la seguretat, i la construcció d'estructures de llarga durada.

Els principis generals són aplicables al disseny d'estructures completes (edificis, ponts, estructures industrials, etc), i els elements estructurals que conformen l'estructura i els fonaments. És aplicable també a les successives etapes en la construcció, és a dir, la fabricació d'elements estructurals, el transport i manipulació dels elements estructurals, la seva erecció i tota la feina a l'obra, així com l'ús de l'estructura durant el seu temps estimat de vida dissenyat, inclòs el manteniment i reparació.

A aquesta norma podem trobar la definició de la probabilitat de fallada  $P_f$  i de l'índex de fiabilitat  $\beta$  de la mateixa manera que a l'Eurocodi EN 1990.

#### 4.5. ISO 15686-5

Aquesta altra norma ISO (*Buildings and constructed assets. Service life planning. Part 5: Life cycle costing.*) traduït: "Edificis i actius construïts. planificació de la vida en servei. Part 5: cost del cicle de vida", tracta els següents temes relacionats amb la fiabilitat estructural:

- Cost de tota la vida i cost del cicle de vida (*Whole life costing & life cycle costing*)
- Costos no relacionats amb la construcció. (*Non construction costs.*)
- Costos del cicle de vida – Construcció. (*Life cycle costs – Construction*)
- Costos del cicle de vida – Funcionament. (*Life cycle costs – Operation*)
- El cicle de vida l'estructura de dades - Els costos de manteniment. (*Life cycle data structure - Maintenance costs*)
- La incertesa i el risc en el cost del cicle de vida. (*Uncertainty and Risk in Life Cycle Costing*)
- Risc en les hipòtesis del cicle de vida. (*Risk in life cycle assumptions*)

#### 4.6. ISO 13823:2008

Aquesta norma ISO (*General principles on the design of structures for durability*) traduït: "Principis generals en el disseny d'estructures per a la durabilitat" Especifica els principis generals i es recomanen els procediments per a la verificació de la durabilitat d'estructures sotmeses a accions ambientals conegudes o previsibles, incloses les accions mecàniques, provocant la degradació del material que porta a fallades de funcionament. Això ajudarà a garantir la fiabilitat de rendiment al llarg de la vida útil de l'estructura.

Va ser desenvolupada pel Comitè Tècnic ISO ISO / TC 98, Bases per al disseny d'estructures, Subcomitè SC 2, fiabilitat de les estructures.



Aquesta Norma Internacional té els següents objectius:

- Millorar l'avaluació i disseny d'estructures per a una major durabilitat mitjançant la incorporació de principis de ciència de la construcció a la pràctica de l'enginyeria estructural.
- Proporcionar un marc per al desenvolupament de models matemàtics per predir la vida útil dels components de l'estructura

Els principis generals en la verificació i el disseny d'estructures i components per a una major durabilitat en aquesta Norma Internacional s'ha d'utilitzar cada vegada que és necessària una vida útil mínima, en noves estructures, així com per l'avaluació de les estructures existents.

La norma està destinada a exercir una funció harmonització similar a la norma ISO 2394:1998, (Els principis generals sobre la fiabilitat de les estructures), que ha servit en els darrers 30 anys per a la verificació i el disseny de les estructures contra la fallada a causa de la tensió mecànica, gravetat, vent, neu i terratrèmol.

L'objectiu és garantir que tots els models d'anàlisi s'incorporen en el mètode d'estats límits, els mateixos que s'utilitzen actualment per a la verificació i el disseny d'estructures.

La ISO 13823:2008 cobreix:

- Conceptes bàsics per a verificar la durabilitat
- Requisits de durabilitat
- Disseny de la vida útil d'una estructura i els seus components
- Vida útil de servei predita
- Estratègies per al disseny de durabilitat.

Aquesta Norma Internacional no tracta directament de la sostenibilitat de les estructures, però, indirectament, les estructures durables milloren la sostenibilitat de la infraestructura.

#### **4.7. Normatives Internacionals**

Cada país, o regió del món, té el seu propi sistema de codis per al disseny i construcció d'estructures on es defineixen les normes bàsiques, garantint així una seguretat mínima. En alguns països la redacció d'aquests codis o normatives recau sobre els organismes nacionals d'estàndards, o *National Standards Body* (NSB). Alguns exemples són:

- Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR)
- American National Standards Institute (ANSI)
- British Standards Institution (BSI)
- Mexican Dirección General de Normas (DGN)
- Deutsches Institut für Normung (DIN)
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM)
- Japanese Industrial Standards Committee (JISC)

- Korean Agency for Technology and Standards (KATS)
- Nederlandse Norm (NEN)
- South African Bureau of Standards (SABS)
- Standardization Administration of China (SAC)
- Standards Council of Canada (SCC)

#### 4.7.1. Normatives als EEUU

Als Estats Units els codis de disseny estructural tenen el seu origen a les primeres dècades del segle XX, on les estructures les dissenyaven organitzacions individuals d'acord als seus propis criteris, i les autoritats de temes d'edificacions no disposaven d'un mitjà per comprovar els dissenys. Fou necessari aleshores establir unes normes unificades per a tots els que dissenyaven les estructures en la seva jurisdicció. Aquestes regles o codis definien un criteri mínim pel disseny segur. Aquests codis van evolucionar gràcies a la recerca científica en el camp de l'enginyeria estructural.

L'Institut Americà de Construcció en Acer. (AISC, *American Institute of Steel Construction*) és una bona mostra de l'evolució dels estàndards de disseny amb els anys: A l'any 1923 el codi tenia 11 pàgines i el criteri de disseny era el de la Tensió Admissible (ASD, *Allowable Stress Design*). Al 1963 el criteri de disseny era una barreja del ASD amb el Disseny d'Estats Límits (LSD, *Limit State Design* o també anomenat LRFD: *Load and Resistance Factor Design*). No va ser fins el 1986 que es va establir el LSD com el criteri de disseny. L'última versió disponible del codi, de l'any 2005, té 196 pàgines més 231 de comentaris.

Aquest codi, juntament a d'altres relacionats, formen part dels Codis de Construcció Internacionals (IBC, *International Building Codes*) que fan servir els enginyers nord-americans com a base pels seus dissenys estructurals. Des de l'any 2005 tots els codis de la indústria dels EEUU han de superar un cicle de revisions rigoroses per part de l'Institut d'Estàndards Nacionals Americans (ANSI, *American National Standards Institut*).

Als EEUU el conductor principal de l'evolució de l'enginyeria de les estructures ha estat la recerca en el comportament i disseny d'estructures que resisteixin terratrèmols, finançada principalment per la Fundació de Ciència Nacional (NSF, *National Science Foundation*). Aquesta recerca ha estat traslladada després als codis.

Tots els codis de disseny actuals dels EEUU tenen una base més o menys sofisticada d'aplicació de l'anàlisi de fiabilitat. L'objectiu subjacent és produir estructures que tinguin una fiabilitat uniforme sobrepasant un estat límit. Aquest propòsit s'ha complert en gran mesura entre els dissenys dins de qualsevol codi donat, per exemple la fabricació d'estructures d'acer, però no és uniforme en tots els codis, com per exemple entre els ponts d'acer i els edificis d'acer que es dissenyen amb codis diferents (Galambos, 2006).

## **5. Recerca al camp de la fiabilitat estructural**

### **5.1. Treballs de recerca**

A continuació es comenten diferents treballs de recerca enfocats en la fiabilitat estructural.

#### **5.1.1. Metodología Eficiente de Optimización de Diseño Basada en Fiabilidad Aplicada a Estructuras**

Tesi doctoral presentada pel professor Luis Celorrio Barragué de la Universidad de La Rioja, el 4 de maig de 2010, dirigida pel Dr. Eduardo Martínez del Pisón Ascacibar i pel Dr. Francisco Javier Martínez del Pisón Ascacibar. Presentada al Departament d'Enginyeria Mecànica de la Universitat de La Rioja.

En aquesta tesi s'analitza el comportament dels diferents mètodes d'optimització del disseny d'estructures basats en fiabilitat. L'optimització consisteix en minimitzar la funció del cost de l'estructura (pes, volum..) de tal manera que compleixi amb unes restriccions probabilistes obtingudes a partir dels estats límits. Les restriccions són del tipus "la probabilitat de fallada que se superi la tensió admissible en una barra de l'estructura ha de ser menor que un valor fixat per l'enginyer".

L'objectiu de la tesi és el desenvolupament d'un programari per a la resolució de problemes analítics i estructurals que integra procediments d'anàlisi estructural, fiabilitat estructural, anàlisi de sensibilitat de disseny, programació matemàtica i simulació de Monte Carlo. Permet definir el tipus de distribució de les variables aleatòries (accions, resistència, geometria, etc), la dependència entre elles, restriccions, etc. Els resultats obtinguts es verifiquen mitjançant el mètode de Simulació de Monte Carlo.

#### **5.1.2. Aplicació del disseny probabilístic en la fallada d'un moll**

Tesina presentada per Carles López Muñoz amb els tutors Xavier Gironella Cobos i Vicenç Gràcia García de la UPC el maig de 2009.

En aquesta tesina expliquen que el càlcul del "rebase" d'estructures marines es realitza tradicionalment mitjançant el mètode determinista, és a dir, totes les variables considerades pel càlcul menys l'alçada de l'onada són valors fixes i no com una variable aleatòria. Aquest procés està indicat a la ROM 0.2-90 (1990) on l'única incertesa és l'alçada de la onada.

L'actual recomanació d'Obres Marítimes en vigor és la ROM 0.0 (2001), que aborda la verificació dels modes de decisió d'una manera probabilista. Això vol dir que totes les

variables que intervenen en el procés són aleatòries i, per tant representables amb una Funció de Distribució. La ROM 0.0 (2001) inclou els mètodes de càlcul de Nivell II per a la verificació dels modes de fallada i de parada operativa adscrits a uns estats límit i sotmesos a unes condicions de treball que poden tenir lloc durant un interval de temps. El resultat de l'aplicació d'aquest mètode és un nombre i la probabilitat associada a aquest número és una mesura del nivell de seguretat que l'obra té davant del mode de fallada en l'interval de temps. És per això que en aquesta tesina s'aplica el disseny probabilístic de Nivell II, el qual suposa que les variables aleatòries del problema segueixen una distribució normal.

### **5.1.3. Modelos simplificados de respuesta probabilista para la evaluación estructural a flexión de puentes**

Tesina presentada per Eduardo Carrasco González, tutor: Joan Ramon Casas Rius, UPC el juny de 2005.

Aquesta tesina tracta del deteriorament de les infraestructures degut al pas del temps, en especial en els ponts de carretera. L'autor afirma que la pèrdua de seguretat estructural d'un pont podria portar, en el pitjor dels casos a la necessitat d'una substitució del mateix, amb la important repercussió econòmica que això suposaria. És per això que s'intenti prolongar el màxim possible la vida dels ponts existents. El problema que es planteja és d'optimització: saber repartir de la millor manera possible els recursos econòmics disponibles per al manteniment de les infraestructures existents. Per dur a terme aquesta anàlisi l'autor proposa fer servir l'avaluació estructural, ja que permet quantificar la seguretat d'una estructura. Com que la precisió depèn del mètode que s'utilitzi proposa els mètodes probabilistes ja que aquests són els més ajustats.

Aquests mètodes es basen en l'estimació de la probabilitat de fallada d'una estructura o de part d'aquesta, considerant les incerteses associades a cadascuna de les variables bàsiques (variables aleatòries) que determinen el marge de seguretat de l'estructura. Habitualment aquest marge de seguretat ( $M$ ) es planteja com a diferència entre dues variables aleatòries: resposta ( $R$ ), dependent de la geometria i resistència de materials, i sol·licitació ( $S$ ), dependent de les accions sobre l'estructura.

La probabilitat de fallada s'obtidria integrant la variable aleatòria  $M$  per valors en què la diferència entre  $R$  i  $S$  fos menor que zero (domini insegur). Aquest problema sol ser de difícil solució a causa del desconeixement d'expressions explícites de  $R$  i  $S$ , i de la quantitat de variables bàsiques de les que depenen, així com la dificultat que suposa la integració múltiple. És per això que l'autor far servir la simulació, que tenint caracteritzades estadísticament les variables bàsiques (distribució de probabilitat teòrica, mitjana i desviació), permet generar mostres de tantes realitzacions com es vulgui, sense necessitat de conèixer expressions explícites, podent-se estimar així la probabilitat de fallada d'una manera més senzilla. Per a poder simular la variable  $R$  sense necessitat de simular totes les variables que la determinen cal fer els corresponents estudis estadístics de la mateixa.

## 5.2. Instituts i Grups de recerca

Existeixen diferents grups de recerca a tot el món treballant en fiabilitat estructural i vida útil de les construccions. Aquests grups estan formats per investigadors especialitzats en cadascú dels camps en que solen dividir-se. Fan convencions, de periodicitat variable segons cada grup, on presenten els seus treballs. També disposen de publicacions on exposen els seus treballs i notícies relacionades. En aquesta secció presentem alguns d'aquets grups o institucions.

### 5.2.1. Joint Comitee of Structural Safety

El 1971 el Comitè d'Enllaç que coordina les activitats de sis associacions internacionals en enginyeria civil, integrades per CEB, CIB, fib, IABSE i RILEM, van crear el JCSS, Joint Committee on Structural Safety (Comitè Conjunt de Seguretat Estructural), amb l'objectiu de millorar el coneixement general en seguretat estructural. El JCSS sota la presidència del difunt Prof J. Ferry-Borges, Portugal, seguit pel Prof J. Schneider, el Prof R. Rackwitz, el Prof T. Vrouwenvelder i ara professor MH Faber ha tingut més de 40 reunions. Durant aquestes reunions s'han discutit més de 200 documents sobre la seguretat estructural i qüestions relacionades. Diversos documents de caràcter general i d'interès s'han preparat i publicat. Aquests documents han aportat la base per a la preparació de documents d'orientació sobre el disseny i construcció de diferents tipus d'estructures i materials, entre altres documents ISO diversos, Eurocodis i els Codis Model CEB i ECCS.

El JCSS és un comitè en l'àmbit del Risc i Fiabilitat relacionades amb Estructures, en nom del Comitè d'Enllaç de les següents cinc associacions professionals internacionals:

- **CIB:** *International Council for Research and Innovation in Building and Construction*, Consell Internacional per a la Investigació i Innovació en Edificació i Construcció. Originalment: "*Conseil International du Bâtiment*"
- **RILEM:** *Reunion internationale des Laboratoires et Experts des Materiaux*. Reunió Internacional de Laboratoris i Experts en Materials
- **ECCS:** *European Convention for Constructional Steelwork*, Conveni Europeu per a construcció d'estructures d'acer.
- **Fib:** *International Federation for Structural Concrete*. Federació Internacional pel Formigó Estructural.
- **IABSE:** *International Association for Bridge and Structural Engineering*. Federació Internacional per l'Enginyeria de Ponts i Estructures.

El JCSS consisteix en una junta amb un president i està format per diferents Grups de Treball. La creació d'un nou grup de Treball és proposat per la Junta i necessita l'aprovació del Comitè d'Enllaç. Informació detallada sobre la seva estructura i funcionament es pot trobar a [www.jcss.ethz.ch](http://www.jcss.ethz.ch)

Entre els grups d'investigació més importants, involucrats específicament en la investigació de la vida útil de les estructures, es troben els comitès de **CIB-RILEM**:

- Committee 130 CSL: *Calculation Methods for Service Life Design of Concrete Structures*. Mètodes de càlcul per al disseny de vida de servei d'estructures de formigó.
- Committee 140-TSL: *On the Prediction of Service Life of Building Materials and Components*. Predicció de vida útil dels components i materials de construcció.

Aquests grups han publicat els resultats de les seves recerques en diferents congressos internacionals (RILEM, 1988; CIB-RILEM, 1987; Sjöström, 1990 y RILEM, 1995 y 1996).

El comitè CIB W80 / RILEM 175 SLM va presentar al Març de 2004 un informe de l'estat de l'art dintre del Grup de treball per a predicció de vida útil amb mètodes basats en rendiment : "*Service Life Methodologies Prediction of Service Life for Building and Components*" (Metodologies de predicció de vida útil en servei per a construccions i components). Aquesta informació és accessible a: [www.rilem.net/reports.php](http://www.rilem.net/reports.php)

### 5.2.2. ACI, Committee 365: Service Life Prediction

L'Institut del Formigó Americà, *American Concrete Institute* (ACI) és una societat tècnica i educativa sense ànim de lucre que es va fundar l'any 1904. És una de les principals autoritats del món en tecnologia del formigó. ACI és un fòrum per a la discussió de tots els assumptes relacionats amb el formigó i el desenvolupament de solucions als problemes. ACI porta a terme aquest fòrum a través de convencions i reunions, a més de diverses publicacions com "*ACI Structural Journal*" i "*ACI Materials Journal*" on donen difusió al contingut que generen els seus membres: papers, ponències, etc. També porta a terme seminaris i convencions on es reuneixen els seus membres bianualment.

El Comitè 365, *Service Life Prediction*, (predicció del temps de vida en servei) de la ACI, va néixer el 1987 i constitueix un grup notable especialitzat en el tema amb destacades publicacions (ACI SP-82; ACI SP-126; Pomeroy, 1983; Pommersheim y Clifton, 1985; Clifton, 1990 y Hookham, 1991).

Els principals objectius en què treballen darrerament són:

- 1) Revisar la predicció del temps de vida en servei "*Service Life Prediction*" (ACI 365.1R-00);
- 2) Elaborar guies i normes d'ús fent servir predicció del temps de vida en servei per a la gestió eficaç de les estructures en servei, adequat per a donar suport a la sostenibilitat del formigó al ACI.
- 3) Co-patrocinar una sessió tècnica "*Service Life Prediction: It's Not Just Corrosion*" (Predicció de de vida en servei: No és simplement corrossió), amb el comitè 201 a la convenció a Pittsburgh, Pennsylvania, la tardor de 2010;

4) Co-patrocinar una sessió tècnica amb el comitè 348 sobre predicció del temps de vida en servei i seguretat a la convenció a Pittsburgh, Pennsylvania la tardor del 2010;

5) Patrocinar una sessió tècnica en com els models de predicció del temps de vida en servei es poden fer servir per a demostrar la sostenibilitat en una futura convenció;

6) Desenvolupar un grup enfocat en com els models de predicció del temps de vida en servei es poden fer servir per avaluar la sostenibilitat.

Es pot trobar més informació a la seva pàgina web:

[www.concrete.org/committees/committeehome.asp?committee\\_code=0000365-00](http://www.concrete.org/committees/committeehome.asp?committee_code=0000365-00)

### 5.2.3. International Federation for Information Processing. IFIP

IFIP és una organització no governamental i sense ànim de lucre formada per varies associacions que treballen en el camp del processament de la informació. Va ser establerta el 1960 sota els auspicis de la UNESCO, com a resultat del Primer Congrés Mundial d'Informàtica celebrada a París el 1959. Es compon de 101 Grups de treball (*Working Groups*) que reporten a 13 Comitès Tècnics (*Technical Committee*).

En el camp de la Fiabilitat Estructural podem trobar el *Work Group 7.2 (WG 7.2): "Computational Techniques in Distributed Systems"*, Tècniques Computacionals en Sistemes Distribuïts, que presideix Jean-Paul Zolésio. Aquest WG reporta al *Technical Committee 7 (TC7): "System Modeling and Optimization"*, Modelatge de Sistemes i Optimització.

A la seva web, [www.ifip.or.at](http://www.ifip.or.at), expliquen l'organització i la tasca que desenvolupen els diferents grups.

### 5.2.4. CSIRO

CSIRO és la Organització de recerca de la mancomunitat Australiana científica i industrial (*Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation*)

Aquesta organització és la responsable d'organitzar una de les conferències de recerca en construcció més importants que tenen lloc a nivell mundial: la conferència **DBMC**: "*International Conference on the Durability of Building Materials and Components*" (Conferència internacional en durabilitat dels materials de construcció i els seus components), que té lloc en diferents ciutats del món cada 3 anys, i reuneix els grups de recerca i laboratoris més importants, com ara el CSTB francès, cib, NRC-CNRC, RILEM, ASTM, NIST, etc.

La propera conferència, la 12<sup>a</sup>, es farà a la ciutat portuguesa Porto l'abril del 2011 i tractarà sobre els següents temes:

- *Building Physics and Durability*. Física d'edificis i durabilitat
- *Service Life Prediction Methodologies*. Mètodes de predicció de temps de vida de servei.
- *The Durability Approach for Historical and Old Buildings*. Enfocament en durabilitat d'edificis històrics i antics.

- *Building Pathology vs. Durability*. Patologia vs durabilitat en edificis
- *Asset and Maintenance Management*. Gestió d'actius i manteniment.
- *The Durability of Innovative Materials, Systems and Components*. La durabilitat dels materials innovadors, sistemes i components.
- *Life Cycle Analysis and Durable Construction*. Anàlisi del temps de vida i construcció durable.
- *Standardization and Regulation*. Estandardització i regulació.
- *Information Technology as a Tool for Durable Construction Design*. Tecnologies de la informació com a eina per a dissenys de construcció durable.

Es pot ampliar aquesta informació a la seva pàgina web: [www.csiro.au](http://www.csiro.au)

### 5.2.5. ASRANET

ASRANet és una xarxa per integrar la Seguretat estructural, el risc i la fiabilitat. Es va establir l'any 1999 amb el suport de UK EPSRC. La xarxa reuneix a investigadors i professionals amb interessos en l'ús d'Anàlisi de Fiabilitat Estructural, (*Structural Reliability Analysis, SRA*) amb l'anàlisi d'estructures avançat (*Advanced Structural Analysis, ASA*) per resoldre problemes complexos d'enginyeria.

La necessitat d'elaborar aquestes dues disciplines en conjunt és vist com important per a la gestió de la seguretat futura d'una àmplia gamma d'estructures d'enginyeria. No obstant això, els principis que s'han d'adoptar en la vinculació d'aquestes dues disciplines requereixen un major desenvolupament, així com la difusió efectiva. A més, el marc per a l'avaluació del risc quantitatiu (*Quantitative Risk Assessment, QRA*), en què la SRA i AAS s'han d'incorporar, és un tema cada vegada més important que ocupa tant a la indústria com a la comunitat investigadora.

Els objectius generals de la xarxa són:

- Identificar la recerca necessària, conjuntament amb l'indústria involucrada activament en aquestes àrees
- Documentar les pràctiques actuals i tendències per a:
  - establir directrius de "bones pràctiques"
  - generar casos per estudi i resultats de proves de referència.
  - garantir que els resultats de la investigació es difonen a la indústria, i per ajudar els practicants a que utilitzin aquests resultats.
  - promoure una millor comprensió de les necessitats industrials en la incorporació de la SRA i el ASA dins d'un marc QRA.

### 5.2.6. JICE, Japan Institute of Construction Engineering

L'institut japonès d'enginyeria a la construcció va ser creat al 1973 arran d'una proposta del Consell de Desenvolupament Tecnològic de la Construcció (una instància de revisió del Ministeri de la Construcció), gràcies al finançament de les donacions del sector privat. El JICE té una àmplia xarxa de recursos humans de recerca en els sectors industrial, acadèmic i públic, dintre dels camps de l'enginyeria d'edificació, civil, camins,



rius, etc, i ha realitzat investigacions sobre mes de 7.000 temes amb l'objectiu d'utilitzar, millorar i protegir la infraestructura nacional, la prevenció de catàstrofes, etc.

El propòsit del JICE és "dur a terme amplis i eficaços treballs de R + D en noves tecnologies de construcció que donin suport al creixement d'enginyeria de la construcció al Japó i satisfer les necessitats del govern Japonès i la societat, i per millorar l'enginyeria de la construcció mitjançant la utilització i difusió de noves tecnologies de la construcció, contribuint d'aquesta manera a la millora del benestar públic".

- Promou la recerca, la ciència i la tecnologia des de punts de vista imparcials i neutrals, i té cura del binomi tecnologia i societat.
- Promou la normalització i difusió de tecnologia a través de manuals i publicacions, com ara el "JICE Report".
- Fa recerca directament relacionada amb propostes de mesures, lleis, ordenances i normes tècniques, entre d'altres.

Una de les recerques feta els últims anys ha estat garantir la **fiabilitat** de les instal·lacions dels rius, fent ús de l'experiència adquirida amb els desastres naturals i l'heurística dels fenòmens que les provoquen.

Es pot trobar més informació a la seva pàgina web que disposa de continguts en anglès: [www.jice.or.jp](http://www.jice.or.jp)

### 5.2.7. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja.

El *Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja*, pertany al *Consejo Superior de Investigaciones Científicas*, i és un centre d'investigació i assistència científica i tècnica en l'àmbit de la construcció.

Els camps de treball de l'IETCC inclouen:

- Impulsant la innovació en els sistemes i tècniques constructives
- Analitzant la **fiabilitat de les estructures** i els nous materials
- Investigant per millorar el confort dels edificis i minimitzar el consum energètic
- Investigant la durabilitat dels materials
- Avaluant les causes dels processos patològics en les construccions
- Desenvolupant nous materials i estudiant el reciclatge de residus de demolició, reduint així l'impacte mediambiental

La pàgina web de l'institut on es pot trobar més informació és: [www.ietcc.csic.es](http://www.ietcc.csic.es)

### 5.2.8. IEMAE, Institut d'Estadística i Matemàtica aplicada a l'Edificació.

L'IEMAE és un institut de recerca que pertany a la UPC i que té la seva seu a l'EPSEB, l'Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona.

Dintre del camp de la Fiabilitat estructural treballen en els següents apartats:

- Models probabilistes i deterministes
- Optimització
- Algoritmes basats en simulació
- Implementacions de programari

Es pot ampliar la informació sobre aquest centre a la seva pàgina web:  
<http://iema.upc.edu>

### **5.2.9. Centre d'Integritat Estructural i Fiabilitat dels Materials (CIEFMA), Campus UPC a Terrassa.**

El Centre d'Integritat Estructural i Fiabilitat dels Materials, CIEFMA, pertany al grup consolidat de recerca de Fatiga i Fractura de Materials de la Generalitat de Catalunya i coordina la Xarxa Temàtica de Propietats Mecàniques dels Materials. Actualment forma part de la Xarxa de Centres de Suport a la Innovació Tecnològica de Catalunya (XIT).

Es pot ampliar la informació sobre aquest centre a la seva pàgina web:  
[www.recercaterrassa.upc.edu/node/36](http://www.recercaterrassa.upc.edu/node/36)

## 6. Programari de càlcul d'estructures i Fiabilitat Estructural.

Existeixen a l'actualitat un gran nombre de paquets de *software* destinats al càlcul de probabilitats, fiabilitat o anàlisi de riscos. Molts d'ells han estat desenvolupats per a fer-se servir al manteniment industrial que és un dels llocs on està més arrelada la cultura de la fiabilitat, ja que la seva aplicació té una conseqüència econòmica directa molt important.

El programari de càlcul d'estructures que es fa servir per al disseny d'edificis com ara CYPE o TRICALC funcionen amb els mètodes indicats als codis d'edificació actuals (CTE, EHE) i no incorporen cap consideració o apartat específic per a calcular l'estructura mitjançant els mètodes probabilístics.

A continuació es comenten alguns dels programaris que tenen més relació amb la fiabilitat estructural:

### 6.1. CodeCal

CodeCal, *Code Calibration Program*, és un programari que funciona amb *Microsoft Excel* i la seva finalitat és el calibratge de codis basats en fiabilitat (*Reliability Based Code Calibration*). Està enfocat en els codis de disseny estructural que es basen en el format de disseny per factors de càrrega i resistència (*LRFD*), com ara l'EUROCODI.

Els paràmetres d'entrada necessaris són el format de seguretat i les variables estocàstiques, i amb aquestes dades CodeCal avalua l'índex de fiabilitat beta per a un conjunt determinat de factors de seguretat fent servir el mètode FORM. Fent servir mètodes d'optimització també és capaç de determinar els factors de seguretat parcials i les combinacions de càrrega corresponents a un nivell de seguretat predefinit, pel qual es pot considerar fins a tres materials diferents a la vegada.

CodeCal és *freeware* i es pot descarregar des de la pàgina del JCSS (*Joint Committee on Structural Safety*): [www.jcss.ethz.ch/codecal/codecal.html](http://www.jcss.ethz.ch/codecal/codecal.html)

The screenshot shows the 'CodeCal Calibration Program - Input Sheet' in Microsoft Excel. The interface is divided into several sections:

- Top Bar:** Contains the title 'CodeCal 03.01\_Beta.xls [Modo de compatibilidad] - Microsoft Excel' and a menu bar with options like 'Inicio', 'Insertar', 'Diseño de página', 'Fórmulas', 'Datos', 'Revisar', 'Vista', and 'Complementos'.
- Navigation:** Includes buttons for 'Check Design Situation', 'Clear Sheet', 'Fill in Example Values', and 'Compute'.
- Checklist:** A list of six items: 1. General Input, 2. Design Situation, 3. Time Invariant Variables, 4. Variable Loads, 5. Partial Safety Factors, and 6. Computation Options.
- 3. Stochastic Model of Time Invariant Variables:** This section contains input fields for three resistances ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ), three model uncertainties ( $\xi_1$ ,  $\xi_2$ ,  $\xi_3$ ), and a dead load ( $G$ ).
  - Resistance  $R_1$ :** Material: 'Structural Steel, etc.', Distribution Type: 'Lognormal',  $E[R_1] = 1$ ,  $D[R_1] = 0.05$ ,  $F[R_{th}] = 5\%$ .
  - Resistance  $R_2$ :** Material: 'Concrete, etc.', Dist. Type: 'Lognormal',  $E[R_2] = 1$ ,  $D[R_2] = 0.15$ ,  $F[R_{th}] = 5\%$ .
  - Resistance  $R_3$ :** Material: 'Timber, etc.', Dist. Type: 'Weibull',  $E[R_3] = 1$ ,  $D[R_3] = 0.2$ ,  $F[R_{th}] = 5\%$ .
  - Model Uncertainty  $\xi_1$ :** Distribution Type: 'Lognormal',  $E[\xi_1] = 1$ ,  $D[\xi_1] = 0.1$ .
  - Model Uncertainty  $\xi_2$ :** Dist. Type: 'Lognormal',  $E[\xi_2] = 1$ ,  $D[\xi_2] = 0.1$ .
  - Model Uncertainty  $\xi_3$ :** Dist. Type: 'Lognormal',  $E[\xi_3] = 1$ ,  $D[\xi_3] = 0.1$ .
  - Dead Load  $G$ :** Distribution Type: 'Normal',  $E[G] = 1$ ,  $D[G] = 0.1$ .
  - Partial Safety Factors:**  $\gamma_{mR2} = 1.5$  and  $\gamma_{mR3} = 1.5$ .
- Important Note:** A blue box stating: 'These Parameters have to be specified only, if the calculation of reliability indexes or the optimization of safety factors should consider different materials, e.g. structural steel, concrete, timber, etc.'

Figura 6.1 Pantalla d'introducció de dades del programari CodeCal.

## 6.2. NESSUS.

NESSUS (*Numerical Evaluation of Stochastic Structures Under Stress*): Avaluació numèrica d'estructures estocàstiques sota tensió. Aquest programari fou desenvolupat per l' institut de Recerca Southwest amb el patrocini de la NASA (*Lewis Research Center*), i la primera versió data de l'any 1989.

Combina l'anàlisi probabilística amb el codi de propòsit general d'elements finits/elements de contorn. L'anàlisi probabilística compta amb una tècnica avançada del valor mitjà. El programari també inclou tècniques com la convolució ràpida i el mostreig d'importància adaptiva basada en la curvatura. A mes a mes es basa en el concepte d'un estat límit que reflecteix la fallada definida pel dissenyador. Segons els seus desenvolupadors NESSUS té l'eficiència i l'exactitud requerida en estructures complexes de grans dimensions gràcies a la unió dels mètodes d'anàlisi estructurals estàndard amb els algorismes probabilístics aproximats.

El principal avantatge d'utilitzar aquests mètodes és que es poden obtenir les estimacions de la fiabilitat estructural i la identificació de les variables aleatòries

importants amb relativament poques anàlisis estructurals. Encara que la precisió no es pot garantir en general, l'experiència ha demostrat el correcte resultat en gairebé tots els problemes.

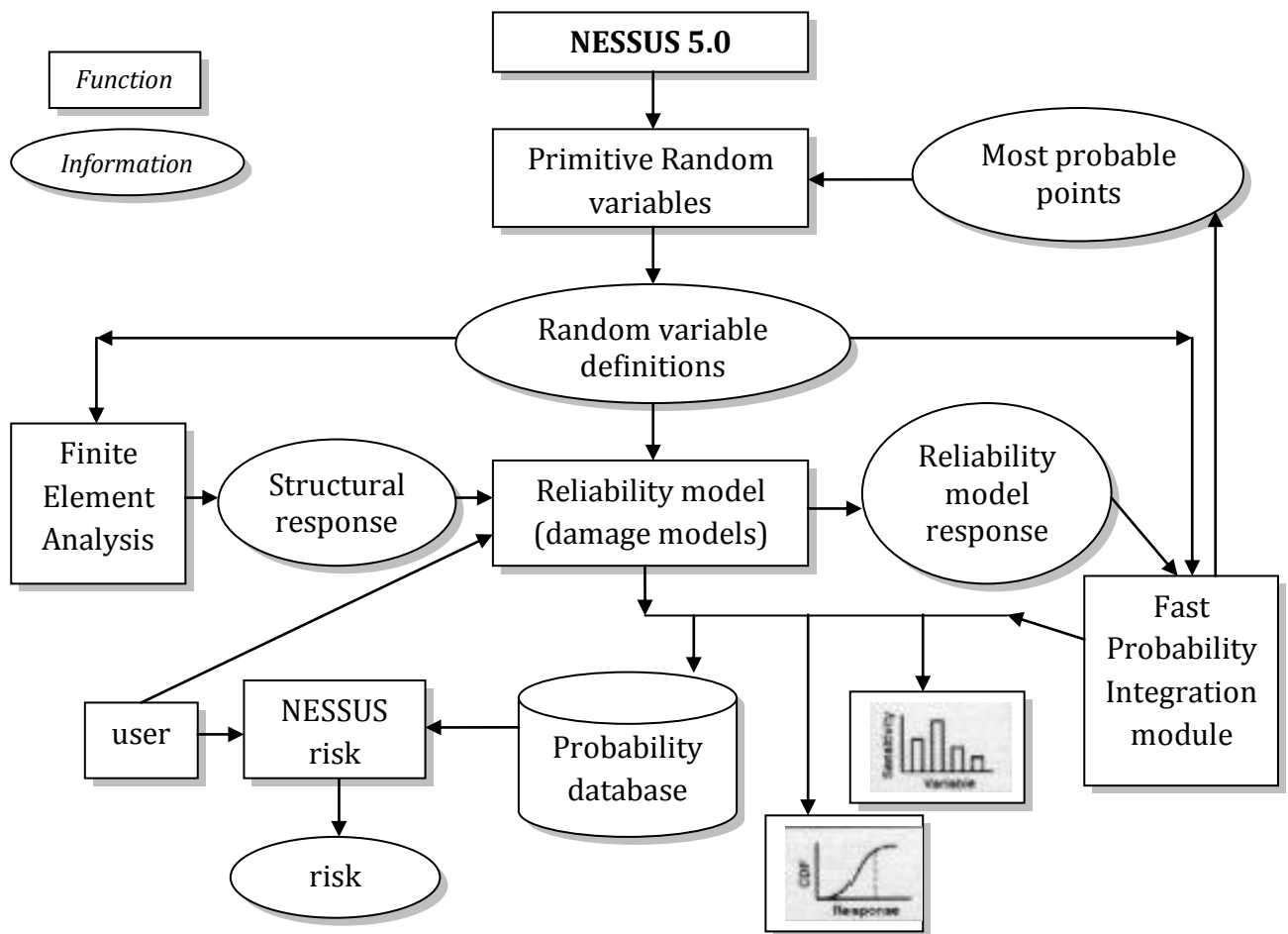


Figura 6.2 Diagrama dels components principals de NESSUS.

Els dos mòduls més importants són el FEM i el FPI:

FEM: (*Finite Element Method*) mòdul d'elements finits que s'utilitza per calcular el comportament estructural d'interès i la sensibilitat de l'estructura respecte cada variable aleatòria.

FPI: (*Fast Probability Integration*). El mòdul d'integració de probabilitat ràpid utilitza les dades de sensibilitat estructural i les variables estadístiques per calcular la resposta probabilista, coma ara el PDF i el CDF, i els factors de sensibilitat probabilístics.

NESSUS permet l'entrada i sortida de dades definides com aleatòries o deterministes. Per exemple, paràmetres d'entrada com les propietats dels materials (Mòdul de Young, coeficient de Poisson, etc) es poden modelar com a variables aleatòries sempre i quan l'usuari proveeixi les dades estadístiques necessàries: mitjana, desviació estàndard i tipus de distribució (Normal, Weibull o Lognormal). Llavors l'anàlisi probabilista obté les funcions de distribució acumulada (CDF) de les variables aleatòries de sortida, com per exemple la tensió i els desplaçaments.

### 6.3. CARMEN

CARMEN és una eina de programari lliure que serveix per a editar i avaluar models gràfics probabilistes (MGPs). També desenvolupa un mètode d'anàlisi cost-eficàcia per als problemes de les diverses decisions que pot ser aplicat tant en els arbres de decisió com en diagrames d'influència. Aquest programari és la Tesis doctoral del professor Manuel Arias Calleja, del Departament d'Intel·ligència Artificial de la UNED al setembre de 2009. Aquest programari es distribueix sota la llicència LGPL.

Una de les possibles aplicacions d'aquest programari és l'aprenentatge de xarxes bayesianes a partir de bases de dades fent servir algorismes de cerca estàndard.

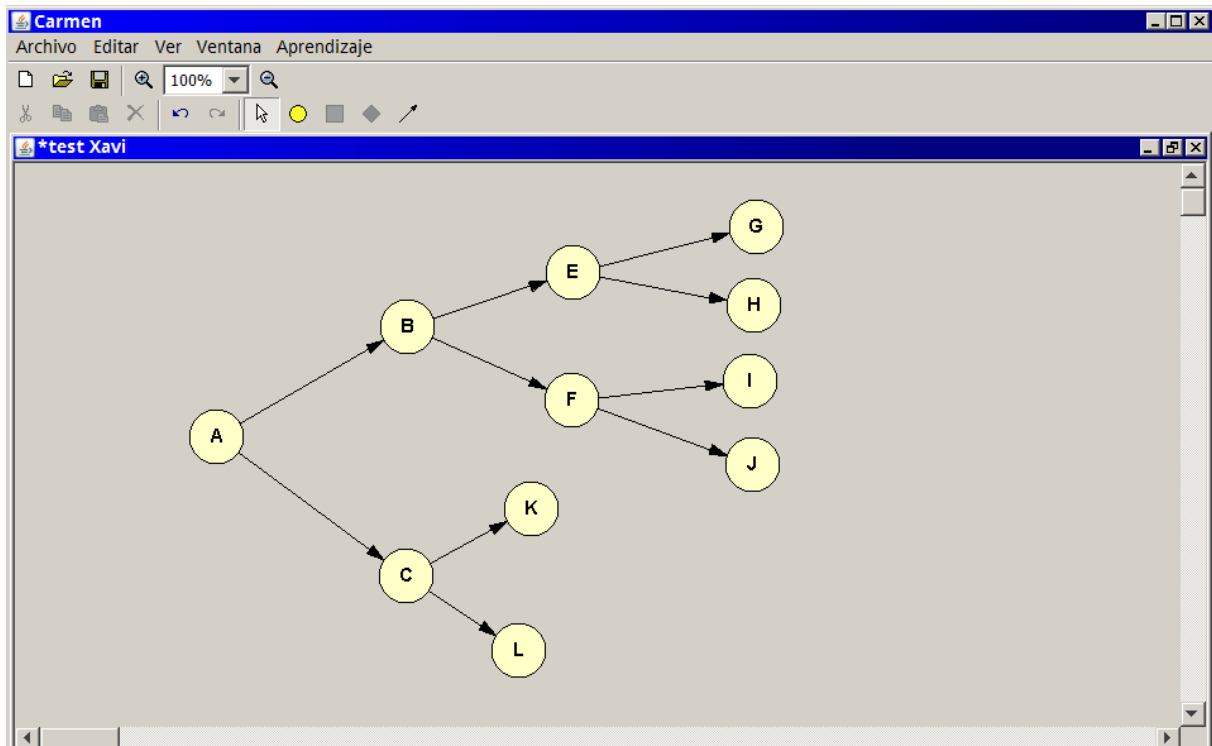


Figura 6.3 Pantalla d'introducció de dades del programari CARMEN.

CARMEN conté biblioteques per als gràfics, per a les operacions bàsiques amb els potencials de les variables discretes, i per a la creació i edició de MGP (models gràfics probabilistes).

### 6.4. PROBAN

PROBAN (PROBability ANalysis) va ser desenvolupat al *Det Norske Veritas*, Noruega, pel departament *A.S. Veritas Research*. Aquest programari és una eina d'anàlisi probabilística, fiabilitat i anàlisi de sensibilitat. Fa servir mètodes computacionals avançats. És capaç d'estimar la probabilitat de fallada fent servir els mètodes de primer i segon ordre FORM i SORM per a un sol esdeveniment o també unions, interseccions i unions d'interseccions. Té una extensa biblioteca de distribucions de probabilitat. Els resultats aproximats FORM/SORM es poden actualitzar a través d'un esquema de

simulació de mostres per importància (*importance sampling simulation scheme*). La probabilitat dels esdeveniments generals es poden calcular mitjançant el mètode de simulació Monte Carlo i el mostreig direccional. També disposa d'altres mètodes de càlcul com per exemple el mostreig per Latin Hipercube. Així mateix conté les característiques necessàries per a realitzar l'actualització bayesiana i estudis paramètrics.

Algunes característiques de Proban:

- Anàlisi de problemes de fiabilitat i distribució
- Anàlisi de sensibilitat paramètrica
- Estudis paramètrics
- Anàlisi de la importància
- Anàlisi de sistemes: analitzar una sèrie de modes de fallada al mateix temps
- Anàlisi comparatiu de la qualitat de conceptes alternatius
- Determinació dels factors de seguretat i coeficients parcials
- Determinació dels valors més probables de les variables del model, com per exemple les càrregues en cas de fallada.
- Anàlisi de probabilitat condicional, com per exemple, mitjançant l'ús d'informació obtinguda en les inspeccions
- Estenent un procediment de solució determinista en un probabilístic, especificant el model de forma interactiva en PROBAN o vinculant PROBAN a qualsevol solució de programari existent
- Funcions avançades com processos estocàstics i anàlisi de fiabilitat implicades

## 6.5. CALREL

CALREL (CAL-RELiability) és un programa del d'anàlisi estructural de propòsit general dissenyat per a calcular integrals de probabilitat. CALREL es va desenvolupar a la Universitat de Califòrnia a Berkeley per Liu et al. A l'abril de 2005.

Incorpora quatre tècniques generals per al càlcul de la probabilitat de fallada:

- FORM
- SORM
- Simulació direccional amb superfícies exactes o aproximades
- Simulació de Monte Carlo

Té una biblioteca de distribucions de probabilitat de variables aleatòries independents i dependents. Altres distribucions addicionals poden ser incloses a través d'una subrutina definida per l'usuari.

És possible que els enginyers estructurals sense formació en disseny basat en la fiabilitat no puguin utilitzar aquest programa d'ordinador inicialment, però es poden formar fàcilment. Aquesta experiència s'ha integrat amb el concepte de disseny basat en la fiabilitat. Per tant, pot ser necessari afegir les característiques probabilístiques als paquets d'elements finits deterministes existents (Chen, 2005).

## 6.1. J-SURESIM

Programari desenvolupat en JAVA del algoritme SURESIM (Faulin et al. 2005; Juan et al. 2008)

Algoritme basat en la simulació per predir la fiabilitat estructural dependent del temps. (*Simulation-based Algorithm to Predict Time-dependent Structural Reliability*).

Aquest algoritme fa servir simulació d'esdeveniments discrets per predir la fiabilitat estructural dependent del temps.

## 6.2. Programari de RELIASOFT

Una de les empreses més importants en el desenvolupament i comercialització de programari d'anàlisi i càlcul de probabilitat. (<http://www.reliasoft.com>)

- **Weibull++:** *Life Data Analysis (Weibull Analysis) Software Tool*  
El programari realitza l'anàlisi de dades de la vida utilitzant diverses distribucions de vida útil (incloent totes les formes de la distribució Weibull). És un programari d'anàlisi estadística per a aplicacions de fiabilitat.
- **ALTA:** *Accelerated Life Testing Data Analysis Software Tool*  
Tècniques quantitatives de vida accelerada en conjunció amb l'anàlisi de dades QALT permet reduir els temps de proves, reduint a la vegada els costos de desenvolupament del producte.
- **DOE++:** *Software Tool for Experiment Design and Analysis (DOE)*  
Aquest programari facilita les tècnica de disseny d'experiments (DOE) tradicional per tal de poder estudiar els factors que poden afectar a un producte o un procés i identificar els factors significatius i optimitzar dissenys. També permet fer servir els mètodes estàndard per a l'anàlisi de les dades censurades en un interval i dades censurades a la dreta.
- **RGA:** *Reliability Growth Analysis and Repairable System Analysis Software Tool*  
Aquest programari permet aplicar els models de creixement de la fiabilitat per analitzar dades per al desenvolupament d'assaigs i sistemes reparables. En la fase de desenvolupament de prototipus permet quantificar el creixement de la fiabilitat que assoleixen els successius.
- **BlockSim:** *System Reliability and Maintainability Analysis Software Tool*  
Proveeix una plataforma comprensiva per a la fiabilitat de sistemes, disponibilitat, manteniment, i anàlisis relacionades. Permet el modelatge de sistemes o processos mitjançant diagrames de blocs de fiabilitat (RBDs) o arbres d'anàlisi de fallades (FTA), o una combinació dels dos.
- **RENO:** *Simulation Software for Probabilistic Event and Risk Analysis*  
Plataforma per a construir i executar anàlisis complexes per a qualsevol escenari probabilístic o determinístic fent servir el modelat enfocat a diagrames de flux i



simulació. Es poden crear models de diagrama de flux per a anàlisi complex de fiabilitat, de risc i anàlisi de seguretat, presa de decisions i també la planificació del manteniment.

- **Lambda Predict:** *Standards Based Reliability Prediction Software Tool*  
Quan les dades reals de la fiabilitat d'un producte no són disponibles, la predicció de fiabilitat basada en estàndards es poden utilitzar per avaluar la viabilitat del disseny, comparar alternatives al disseny, identificar àrees potencials de fallada, millora de fiabilitat, etc. Lambda Predict ofereix prediccions de rati de fallada i temps mitjà entre fallades (MTBF *predictions*) basat en els estàndards de mesura de fiabilitat MIL-HDBK-217-*predictions*, *Bellcore predictions*, *Telcordia predictions* i *NSWC Mechanical predictions*.
- **Xfmea:** *Failure Modes, Effects and Criticality Analysis. FMEA and FMECA Software Tool*  
Xfmea facilita la gestió de dades i presentació d'informes per a tot tipus de modes de fallada i anàlisi d'efectes— FMEA —, efectes i anàlisi crítics — FMECA.
- **RCM++:** *Reliability Centered Maintenance (RCM) Software*  
Facilita la gestió de dades i presentació d'informes per a anàlisi de manteniment centrat en fiabilitat (RCM analysis). Inclou la funcionalitat FMEA /
- **XFRACAS:** *Web-Based Failure Reporting Software (FRACAS System)*  
Eina basada en la web, dissenyada per a l'adquisició, administració i anàlisi de fiabilitat de productes, qualitat i dades de seguretat.

### 6.3. Programari amb Mathcad

Dintre de l'article que té per títol “Métodos elementales de fiabilidad estructural” (2005) de Milan Holický (Instituto Klokner, Universidad Técnica Checa de Praga, República Checa) i Ton Vrouwenvelder (Universidad de Tecnología de Delft, TNO BOUW, Holanda) hi ha uns annexes amb exemples de càlcul de fiabilitat estructural desenvolupats en MATHCAD. Consideren un cas fonamental de dues variables aleatòries quan la funció d'estat límit es formula com la diferència entre la resistència de l'estructura i l'efecte de la càrrega. La hipòtesi inicial d'una distribució normal per a les dues variables es pot generalitzar per a qualsevol tipus de distribució de probabilitat.

Algunes utilitats són:

- **SteelRod.mcd** serveix per a estudiar l'efecte del coeficient parcial  $\gamma_G$  en relació a la fiabilitat d'un tirant d'acer sotmès a l'efecte d'una càrrega permanent G.
- **DesVRod.mcd** aquest full de MATHCAD es pot utilitzar per a l'estudi dels factors de sensibilitat  $\alpha_E$  y  $\alpha_R$  i els valors de càlcul  $E_d$  y  $R_d$ .
- **PrLnLn.mcd** aquest full de càlcul permet determinar la probabilitat de fallada  $P_f = P\{E > R\}$  suposant una distribució log-normal de tres paràmetres per a las variables E y R.
- **GammaRG.mcd** amb aquest full es pot determinar el coeficient parcial  $\gamma_R$  de la resistència R i el coeficient parcial  $\gamma_G$  de la càrrega permanent G (Holický, 1990).

#### 6.4. Altre programari disponible

A la pàgina <http://www.weibull.com/itools/index.htm> hi ha el següent software gratuït:

- Simple Weibull Analysis
- Obtain parameters for the 2-parameter Weibull distribution, using your data.
- Rank Calculator
- Obtain ranks given a sample size and order number.
- Quick Statistical Reference
- Obtain values for commonly used statistical functions.
- Exponential Design of Reliability Tests Calculator
- Obtain test time to demonstrate an MTBF (or reliability) assuming an exponential distribution.

## 7. Conclusions i línies d'actuació futures

L'anàlisi estructural mitjançant les tècniques de probabilitat sembla que ha de ser el següent pas lògic si mirem amb perspectiva l'evolució dels mètodes de càlcul d'estructures dels últims anys: A Espanya, a l'any 1960, els càlculs d'estructures metàl·liques es feien mitjançant la "*Instrucción E.M. 62*" del I.E.T.C.C, que estava basada en el mètode de les tensions admissibles. L'evolució posterior que ha tingut la normativa (MV-103, NBE AE-95, etc) passant pel mètode del coeficient global de seguretat, i arribant al mètode del coeficients parcials de seguretat, que és semi-probabilista, el que vol dir que darrera de les dades que ens ofereixen la normativa i els codis hi ha un estudi probabilístic de les variables i les seves incerteses.

Normatives actuals com ara el CTE o l'Eurocodi incorporen annexos on s'inclouen les tècniques de càlcul probabilista. El JCSS (*Joint Committee on Structural Safety*) ha desenvolupat un codi probabilístic on per exemple a l'hora de definir les càrregues d'un parking per a cotxes té en consideració variables com: "temps ocupat per any", "dies ocupat per any", "pes del cotxe" o "taxa de renovació". Això ens dona a entendre que l'aplicació d'aquests nous mètodes demana d'un major coneixement de les variables aleatòries que hi intervenen, com no podria ser d'altra manera, si volem una optimització del càlcul, ajustant per valors de fiabilitat i cost-benefici. En conseqüència, aquesta línia de recerca ha de ser una de les capdavanteres en els propers anys.

En aquest mateix sentit, els treballs d'investigadors en aquest camp, com ara per exemple Bensoussan, A; Choi, S-K.; Ditlevsen, O; Frangopol, D. M.; Lemaire, M.; Melchers, R. E.; Sørensen, J.; Thoft-Christensen, P.; entre d'altres, apunten a un futur on tingui molta més importància el càlcul estructural amb mètodes probabilístics, i que hi permetin optimitzar els recursos amb una fiabilitat més definida al mateix temps.

A Espanya un primer pas en aquesta direcció és la tesi doctoral presentada pel professor Luis Celorrio Barragué amb títol "*Metodología eficiente de optimización basada en fiabilidad aplicada a estructuras*" en la que estudia els mètodes d'anàlisi de fiabilitat i aplica els mètodes RBDO (Optimització de disseny basats en fiabilitat) proposant un programari per al càlcul de la fiabilitat d'estructures. De tota manera, el professor Luis Celorrio fa un comentari molt interessant al respecte de l'aplicació dels mètodes probabilistes: "L'aplicació d'aquests (mètodes) és perfectament legal ja que els codis permeten l'aplicació dels mètodes probabilistes explícits però no tenen una bona acollida entre els calculistes d'estructures ja que generalment no tenen els coneixements necessaris en estadística i s'estimen més "curar-se en salut" i aplicar criteris deterministes tradicionals recollits en el cos central de la normativa". En la nostra opinió cal fer un esforç didàctic important per tal de sensibilitzar el sector vers l'ús dels nous mètodes de càlcul.

## 8. Bibliografia

- Chen, W. (2005). *Handbook of Structural Engineering*, (pp. 1-26) CRC Pr I Llc.
- Choi, S-K. et al. (2006). *Reliability-based Structural Design*. Springer, 1 edn.
- Clemente Tirado, J.J. (2005) *Introducción a la evaluación de estructuras existentes aplicando técnicas de fiabilidad*,  
 Department for Communities and Local Government: London (2007). Companion Document. EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1: General rules and rules for buildings. Final Research Report: BD 2403
- Ditlevsen, O. & Madsen, H. O. (2005). *Structural Reliability Methods*. John Wiley & Sons.
- EN 1990 (2000). *Eurocode, Basis of Structural Design, EN1990*.
- Escola, R (1988). Fiabilidad estructural. Revista de obras públicas. Diciembre 1988. pp 1111-1125
- Fatemeh, J. et al (2009) Confidence factors and structural reliability. E. Cosenza (ed), Eurocode 8 Perspectives from the Italian Standpoint Workshop, 39-52,
- Haldar, A. & Mahadevan, S. (1999). *Probability, Reliability, and Statistical Methods in Engineering Design*. Wiley, 1 edn.
- Hurtado, J. E. (2004). *Structural Reliability: Statistical Learning Perspectives* (Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics). Springer, 1 edn.
- Holický, M. & Vrouwenvelder, T. (1990). *Conceptos básicos de fiabilidad estructural*. [alcala.ietcc.csic.es](http://alcala.ietcc.csic.es), 1-12.
- Lemaire, M. (2009). *Structural Reliability*. Wiley-ISTE.
- Marek, P., Gustar, M. & Sánchez-Silva, M. (2001) *Nuevos conceptos para la evaluación cualitativa de la confiabilidad en el diseño estructural*.
- Melchers, R. E. (1999). *Structural Reliability Analysis and Prediction*. John Wiley & Sons, 2 edn.
- Rocscience.com. *Reliability Index* [en línia].[Data de consulta: 25 de novembre del 2009]. Disponible a [http://www.rocscience.com/downloads/swedge/WebHelp/swedge/Reliability\\_Index.htm](http://www.rocscience.com/downloads/swedge/WebHelp/swedge/Reliability_Index.htm)
- Pérez, J. (2000): Apuntes de Patología de estructuras. E.T.S.A. de La Coruña.
- Rivero, P. (2009) *El Código de Hammurabi*. Universidad de Zaragoza [en línia].[Data de consulta: 11 de febrer del 2010]. Disponible a <http://clio.rediris.es/clionet/fichas/hammurabi.htm>
- Thoft-Christensen, P. i Murotsu, Y, (1986) *Application of Structural Systems Reliability Theory*. Springer
- Veiga, J. M. G. C. (2009). 'Métodos de análise das incertezas na verificação da segurança estrutural em engenharia civil'. Master's thesis.
- Weibull.com "Reliability Function" [en línia].[Data de consulta: 4 de febrer del 2010]. Disponible a <http://www.weibull.com/hotwire/issue7/relbasics7.htm>
- Wilshusen, R. B. (1995) *Reliability Index Versus Safety Factor of Structures*. Air Force Inst Of Tech Wright-Patterson Afb Oh
- Xila, L. (2007) ICE-CDP Courseware. Shanghai Jia Tong University. [en línia].[Data de consulta: 2 de febrer del 2010]. Disponible a: <http://naoce.sjtu.edu.cn/iem/ice/>

### 8.1. Bibliografia complementària

- Bensoussan, A. (2005). "Reliability Index". In *Optimal Control and Dynamic Games*, pp. 311-317
- Corps Risk Analysis Gateway [en línia].[Data de consulta: 2 de febrer del 2010]. Disponible a: <<http://www.corpsriskanalysisgateway.us>>
- Egeland, T. (1991). *Two trends in reliability*. *Structural Safety* 9(4):261–268.
- Frangopol, D. M. et al. (2007). *Reliability and Optimization of Structural Systems: Assessment, Design, and Life-Cycle Performance*. Taylor & Francis, 1 edn.
- Gulvanessian, H. (2008). *Introduction to EN 1990*. Dissemination of information workshop.
- Juan, A.A., Faulin, J. et al., 2008. A Simulation-based Algorithm to Predict Time-dependent Structural Reliability. In M. Rabe *Advances in Simulation for Production and Logistics Applications*. Stuttgart.
- Schumacker, R.E., (2005) Classical test analysis. Applied Measurement Associates.
- Sørensen, J., *Note 1+ 2: Structural Reliability*. [en línia].[Data de consulta: 26 de març del 2010]. Disponible a <<http://administration.ewi.tudelft.nl/live/binaries/a4751543-3c3e-4787-b3c2-ae34f717f351/doc/citatie3.pdf>>
- Kuo, W. & Zuo, M. J. (2002). *Optimal Reliability Modeling: Principles and Applications*. Wiley.
- Life Cycle Asset Management and ISO 15686-5 / Presentation to Icelandic Nordic FM Project / Kathryn Bourke, March 2008
- Rackwitz, R. (2001). "Reliability analysis" a review and some perspectives'. *Structural Safety* 23(4):365–395.
- Sanpaolesi, L (2005) Estados límite y método de coeficientes parciales. Departamento de Ingeniería Estructural, Universidad de Pisa, Italia
- US Army Corps of Engineers [en línia].[Data de consulta: 2 de febrer del 2010]. Disponible a: <<http://www.usace.army.mil>>
- Zhao, Y. (2001). 'Moment methods for structural reliability'. *Structural Safety* 23(1):47–75.

## AGRAÏMENTS

Als directors d'aquest PFC: Carles Serrat i Piè, Isabel Serrà Martin.

L'IEMAE: Institut d'Estadística i Matemàtica Aplicada a l'Edificació, de l'Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona, UPC. (<http://iemae.upc.edu>)

...

Tots els gràfics s'han fet amb el programari **Inkscape 0.47** ([www.inkscape.org](http://www.inkscape.org))

Les corbes de Gauss s'han fet amb el programari **gnuplot 4.4.0** ([www.gnuplot.info](http://www.gnuplot.info))

La bibliografia d'aquest treball ha estat administrada amb :

<http://www.citeulike.org/>

<http://www.mendeley.com/>