

# O ANALIZĂ DE ANSAMBLU A METODELOR ACTUALE DE PROIECTARE PE BAZA DURATEI DE VIAȚĂ LA SOLICITĂRI VARIABILE

Șef lucrări dr. ing. Marius Nicolae BABA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universitatea „Transilvania“ din Brașov, România

**REZUMAT.** Lucrarea prezintă a vedere critică de ansamblu asupra metodelor actuale folosite uzual în calculele de estimare a durabilității pieselor sau subansamblelor mecanice supuse acțiunii sarcinilor variabile în timp. Concret, aspectele abordate se referă la conceptele de bază ale proiectării pe baza duratei de viață, principiile teoretice și utilizarea practică a acestora, precum și procedurile specifice de calcul împotriva oboselei mecanice, respectiv: prin analiza tensiunilor, prin analiza deformațiilor sau pe baza tolerării defectelor. Toate aceste aspecte reprezintă caracteristici cheie care permit realizarea unor recenzii de proiectare cât mai complete care pot fi aplicate de-a lungul întregii durate de dezvoltare a unei piese sau ansamblu mecanic.

**Cuvinte cheie:** Rezistență la oboseală, durabilitate, solicitări variabile, tensiuni, deformații, deteriorări.

**ABSTRACT.** In this paper a brief critical overview on the common approaches employed in evaluating the lifetime of mechanical parts and their related assemblies under variable loading conditions is presented. Specifically, the covered issues are related to the basic design concepts, their principles and practical use as well as the involved calculation procedures intended to analyze the occurrence of fatigue failures; such as stress-life, strain-life and damage tolerance. All these aspects are important key features that enable to perform comprehensive lifetime - based design reviews during the development of a certain mechanical part or assembly.

**Keywords:** Fatigue strength, durability, variable loading, stresses, strains, damage tolerance.

## 1. INTRODUCERE

Chiar dacă în contextul tehnologic actual analizele de durabilitate structurală și rezistență la solicitări mecanice variabile se pot efectua aproape în exclusivitate cu ajutorul computerelor, trebuie avut în vedere că utilizarea unui software performant de proiectare și/sau optimizare poate conduce la obținerea unor rezultate eronate dacă componenta sau structura analizată nu a fost idealizată corect, dacă modelul de calcul nu este adecvat sau dacă metoda aleasă nu este corespunzătoare. Computerul face de fapt doar ceea ce i se comandă, astfel că în ziua de astăzi mai mult ca oricând, i se cere inginerului proiectant sau cercetător să investească o cantitate considerabilă de cunoștințe și imaginație în toate etapele derulării unui studiu de durabilitate sau rezistență la oboseală. Se poate spune, așadar, că este absolut necesar ca inginerul de calcul structural să reușească să pătrundă și să înțeleagă în complexa lor interdependență cauzală fenomenele ce se produc sub acțiunea sarcinilor exterioare variabile în timp, în componenta, subansamblul sau structura mecanică care face obiectul proiectului, astfel încât să fie capabil să decidă în deplină cunoștință de cauză care

dintre abordările sau metodele de calcul disponibile sunt cele mai adecvate în raport de specificul, avantajele, dezavantajele și limitările fiecăreia.

Renunțând la orice intenție de tratare exhaustivă a metodelor fiabiliste de proiectare a structurilor mecanice supuse acțiunii sarcinilor variabile în timp, în cele ce urmează se prezintă câteva puncte de vedere critice asupra principiilor și metodelor actuale de abordare deterministă a calculelor de durabilitate și rezistență la oboseală mecanică, într-o accepțiune de ansamblu, consacrată de altfel în literatura de specialitate și amplu dezvoltată în bibliografia anexată lucrării.

## 2. CONSIDERAȚII CONCEPTUALE

În fazele inițiale calculele de rezistență la solicitări variabile s-au bazat pe conceptul „infinite-life design”, adică proiectare la durabilitate nelimitată. Punerea în practică a acestui concept impunea ca valorile locale ale tensiunilor și deformațiilor specifice să se încadreze în limitele de comportare elastică a materialului, urmărindu-se determinarea unui coeficient de siguranță raportat la o valoare

certă a limitei de oboseală, astfel încât funcționarea sigură a unei piese sau ansamblu să fie asigurată o perioadă de timp practic nedefinită. Pentru componentele mecanice solicitate la un număr foarte mare de cicluri, de ordinul a zecilor de milioane, luând pentru exemplificare cazul arcurilor de supapă ale motoarelor cu ardere internă, acest criteriu reprezintă o opțiune de proiectare aplicabilă chiar și în contextul tehnologic actual. Având însă în vedere că în majoritatea aplicațiilor ingineresti este dificilă sau uneori chiar imposibilă definirea unei valori certe a limitei la oboseală pentru un material și cu atât mai mult pentru o componentă mecanică (ca urmare a diverselor incertitudini determinate de variația proprietăților fizice și mecanice ale materialului constitutiv, geometriei mai mult sau mai puțin complexe, variabilității încărcărilor, abaterilor dimensionale, inconstanțelor în modul de asamblare și montaj, tratamentelor termice sau rugozității suprafețelor datorate regimurilor de prelucrare etc.), aplicarea acestui concept conduce de cele mai multe ori la supradimensionări cu consecințe nefavorabile asupra greutateii, consumului de material, costurilor de fabricație și exploatare, etc.

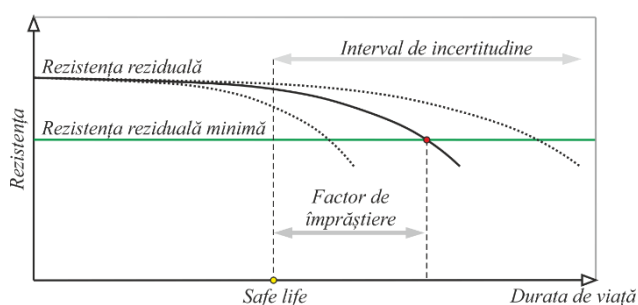


Fig. 2.1. Diagrama schematică a conceptului de proiectare la durabilitate garantată

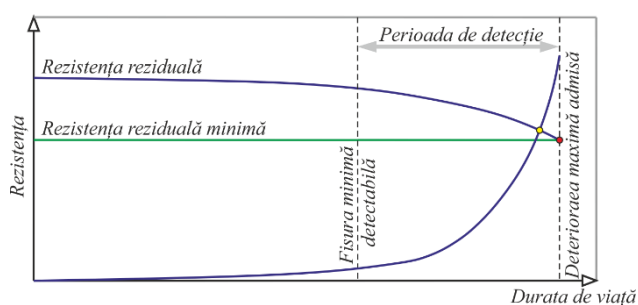
Conceptul „safe-life design“ tradus în limbajul tehnic de specialitate prin termenii proiectare la durabilitate garantată sau proiectare pentru funcționare sigură, are ca obiectiv determinarea duratei de viață sau a intervalului de timp în care piesele componente ale unui ansamblu sau structuri mecanice vor funcționa sigur, adică vor rezista la un anumit număr preconizat de cicluri de solicitare în toate condițiile posibile sau probabile, fără a se defecta sau deteriora. Din punct de vedere al metodologiei de abordare, în principiu, se compară valorile critice ale tensiunilor sau deformațiilor specifice locale, determinate prin calcule efectuate pe un model al componentei sau structurii supuse studiului, cu valorile corespunzătoare unui anumit număr de cicluri de solicitare până la cedare, de pe curba de durabilitate determinată experimental. Conform reprezentării schematice din Figura 2.1, calculul duratei de viață preconizate se face prin aplicarea unor coeficienți de corecție și a unei

marginii de siguranță care să cuprindă cât mai complet și acoperitor influența diferiților factori asupra comportării la oboseală a piesei sau structurii care face obiectul studiului de proiectare. Din punct de vedere tehnic, la atingerea duratei de viață preconizate se înlocuiește componenta sau întregul subansamblu, chiar dacă acestea nu prezintă defecte iar deteriorările datorate oboselii sau uzurii sunt ne semnificative. Experiența a arătat că un asemenea concept nu este întotdeauna corect, pe de-o parte din considerente economice și ecologice referitoare la costurile implicate de înlocuirea componentelor sau subansamblelor care nu și-au epuizat pe deplin resursa de funcționare și pe de altă parte, din considerente de siguranță determinate de posibilitatea, uneori destul de probabilă, de neglijare a unor aspecte mai puțin evidente în faza de proiectare, care pot pune în pericol integritatea întregii structuri. Accidentele catastrofale apărute frecvent la structurile proiectate după acest principiu, în general datorate unor fenomene necunoscute sau neglijate (spre exemplu, oboseala de joasă frecvență în cazul accidentelor avioanelor turboreactoare de Havilland DH-106 Comet sau suprapunerea unor efecte vibratoare în cazul turbopropulsoarelor Lockheed-Electra), au condus la reconsiderarea acestui concept de proiectare.

Conceptul „fail-safe design“ sau în limba română, proiectare la deteriorare (sau cedare) controlată, a fost inițial dezvoltat în domeniul construcțiilor aerospațiale tocmai pentru a preîntâmpina o parte din neajunsurile proiectării pentru funcționare sigură. În mod practic proiectarea structurii în conformitate cu acest concept presupune multiplicarea traseelor de transmitere a eforturilor pentru componentele structurale vitale. Astfel, consecințele eventualelor deteriorări sau cedări locale ale uneia sau mai multor componente pot fi controlate în sensul că acestea nu implică colapsul imediat sau cedarea catastrofală a întregului ansamblu, structura menținându-și capacitatea de a suporta sarcinile prevăzute să apară în exploatare, o anumită perioadă de timp, până la efectuarea reparațiilor sau înlocuirea componentelor afectate. Proiectarea la deteriorare controlată este completată de conceptul siguranței prin control sau „safe by inspection“ care constă în stabilirea și planificarea unor programe periodice de inspecție pentru detectarea fisurilor sau deteriorărilor, făcând astfel posibilă evaluarea corectă a nivelului de risc în diferite ipoteze constructive și funcționale. Prin urmare, o prioritizare a eforturilor de concepție și proiectare pentru asigurarea funcționalității zonelor de acces și vizitare este necesară astfel încât controlul periodic și monitorizarea componentelor structurale vitale să fie posibilă în timpul exploatarei.

Problema siguranței în exploatare a structurilor a condus la conturarea unui nou concept cunoscut în

literatură sub numele de „damage-tolerance design” sau cu alte cuvinte, proiectare cu toleranță la defecte (sau deteriorări). Conform normativului european EN 1999-1-3-2007 [1], toleranța la defecte este definită ca abilitatea unei structuri de a admite fisuri de oboseală fără cedări catastrofale sau pierderea capacității de funcționare. Conceptul de toleranță la defecte pleacă de la presupunerea că în toate zonele solicitate ale unei componente, subansamblu sau structuri mecanice, este posibil să existe defecte sub forma unor discontinuități ce pot fi asimilate drept fisuri. În general prin fisură se poate înțelege un gol de forma unui disc înglobat parțial sau total în volumul unui anumit corp, sau o tăietură rectilinie ce separă două domenii ce urmează a se desprinde reciproc în procesul de rupere [2]. Cu referire la fenomenul de solicitare variabilă, putem defini fisura în sens mecanic ca o discontinuitate ce se dezvoltă în material sub acțiunea unui câmp de tensiuni, pornind de la dimensiuni de ordinul spațiilor dintre atomi [3]. STAS 6488-1992 [4] definește fisurile de oboseală ca fiind discontinuități ale materialului ca urmare a fenomenului de oboseală, caracterizate de două dimensiuni liniare.



**Fig. 2.2.** Diagrama schematică a conceptului de proiectare cu toleranță la deteriorări

Identificarea și evaluarea fisurilor se face în general prin metode și tehnici nedistructive pe baza unor documentații tehnice cu caracter normativ (standarde, specificații tehnice, etc.), în scopul asigurării că de-a lungul unei durate de timp bine definite, evoluția proceselor de extindere să poată fi monitorizată astfel încât niciuna dintre fisuri să nu atingă dimensiunea critică corespunzătoare deteriorării maxime admise (asociată declanșării ruperilor sau cedărilor catastrofale). Așa cum se prezintă schematic în Figura 2.2, durata respectivă reprezintă așa-numita perioadă de detecție prin inspecții succesive la intervale de timp bine stabilite.

Din punct de vedere al controlului nedistructiv, fisura este privită ca un defect cu geometrie variabilă, care poate fi determinat și caracterizat prin diverse tehnici. Conform specificațiilor STAS 12509-86 [5], prin examinarea nedistructivă a unui produs se înțelege examinarea și/sau încercarea care permite obținerea de informații cifrice sau de altă

natură asupra discontinuităților, anomaliilor, deformațiilor geometrice sau a stărilor fizice ale produsului inspectat, prin mijloace care nu alterează aptitudinea de exploatare a acestuia. Studiul literaturii de specialitate relevă existența a trei tipuri de discontinuități care pot afecta un anumit produs, în cazul de față referindu-ne cu predilecție la o componentă sau structură mecanică, și anume: discontinuități intrinseci rezultate în urma proceselor de elaborare a materialelor sau semifabricatelor, discontinuități generate de procesele de fabricație și nu în ultimul rând, discontinuitățile care pot apare în cursul perioadei exploatare.

Discontinuitățile apărute în cursul elaborării materialelor sau semifabricatelor sunt de cele mai multe ori generate în cadrul proceselor tehnologice de formare: turnare, laminare, forjare, extrudare. În condițiile unei proiectări cu toleranță la defecte sau deteriorări astfel de defecte pot fi minimizate prin selecția riguroasă a unor materiale care să aibă un grad de puritate cât mai ridicat și care să nu conțină imperfecțiuni de suprafață. În această categorie sunt încadrate așa-numitele discontinuități de elaborare inerente cum sunt retaturile, suflurile, porozitățile și incluziunile nemetalice, mărimea acestora fiind de obicei suficient de mică pentru a nu evolua semnificativ în cursul exploatării, de multe ori situându-se sub limita de detectabilitate a metodelor de examinare nedistructivă.

Discontinuitățile generate în cadrul proceselor de fabricație apar ca rezultat al prelucrărilor mecanice prin așchiere, deformări plastice, tratamente termice, asamblări, finisări, etc. În astfel de cazuri exigențele proiectării cu toleranță la defecte impun stabilirea și punerea în practică a unor metode de examinare nedistructivă cât mai adecvate, în funcție de caracteristicile tehnologice, funcționale și constructive ale piesei, subansamblului sau structurii analizate. În categoria discontinuităților de fabricație sunt incluse urmele de prelucrare, zgârieturile sau fisurile de rectificare, care pot fi detectate și eliminate prin examinări nedistructive. Există însă și posibilitatea ca o mică parte din acestea să rămână nedetectate și să evolueze în cursul exploatării prin mecanismele specifice propagării fisurilor de oboseală până la dimensiunea critică corespunzătoare pragului de propagare instabilă sau, în anumite condiții, se pot opri din propagare.

Referitor la discontinuitățile care pot apare în cursul exploatării, acestea sunt de cele mai multe ori fisuri datorate oboselii materialelor, uzurii excesive, coroziunii, exploatării în condiții necorespunzătoare, suprasolicitărilor de scurtă durată sau impactului accidental cu obiecte străine. Sub influența sarcinilor repetate sau acțiunii combinate ale diverselor forme de manifestare a fenomenului de oboseală (mecanică, termică, medii corozive, etc.), aceste fisuri se

pot propaga. Cu cât lungimea unei fisuri este mai mare, efectul de concentrare al tensiunilor indus de prezența acesteia se va accentua determinând și o creștere în timp a vitezei de propagare după o curbă exponențială. Astfel de procese au ca efect o diminuare a caracteristicilor de rezistență, rigiditate și stabilitate ale pieselor sau elementelor structurale supuse unor stări variabile de solicitare, provocând reducerea treptată a performanțelor funcționale și integrității structurale a întregului ansamblu. Altfel spus, așa cum se prezintă în figura de mai jos, rezistența reziduală a structurii descrește progresiv odată cu creșterea lungimii fisurii (sau fisurilor).

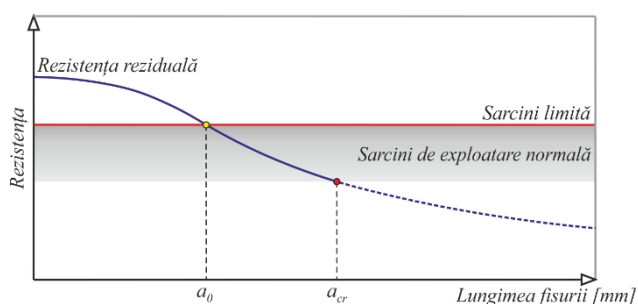


Fig. 2.3. Curba de variație a rezistenței reziduale în funcție de lungimea fisurii

În general normele de proiectare din domeniul construcțiilor de mașini și construcțiilor aerospațiale impun ca nivelul rezistenței reziduale să nu scadă sub nivelul sarcinilor limită. Conform reprezentării grafice din Figura 2.3, această condiție determină lungimea maximă admisă a fisurii detectabile în cursul exploatării, notată uzual cu  $a_0$ . Se consideră critică, lungimea fisurii corespunzătoare limitei inferioare admise a rezistenței reziduale, notată cu  $a_{cr}$ .

Practica proiectării cu toleranță la deteriorări necesită parcurgerea unor obiective specifice care în principal se referă la [6]:

- definirea limitei de acceptabilitate sau cu alte cuvinte a pragului maxim de lungime a fisurilor care pot fi tolerate într-o componentă la intrarea în exploatare;
- calculul rezistenței reziduale în funcție de lungimea fisurii;
- determinarea lungimii maxime admise a fisurii, corespunzătoare nivelului superior al sarcinilor prevăzute să apară în exploatare;
- estimarea duratei de evoluție a fisurii, de la o lungime corespunzătoare unui anumit nivel de detectabilitate până la lungimea maximă admisă;
- planificarea intervalelor de timp aferente inspecțiilor periodice succesive.

În contextul celor prezentate este evident că detecția fisurilor prin metode și tehnici nedistructive reprezintă punctul de plecare al oricărui demers de proiectare cu toleranță la deteriorări. Prin urmare,

evaluarea capabilității de detecție (sau sensibilității) metodelor de examinare nedistructivă este esențială atât în ceea ce privește aprecierea realistă a perioadei de evoluție a fisurii până la atingerea lungimii critice, cât și pentru elaborarea unor protocoale de inspecții periodice care să asigure un cadru unitar de abordare astfel încât toate piesele sau subansamblele componente ale unei structuri să poată fi examinate în condiții identice și într-un mod cât mai reproductibil. Orientativ se poate considera că durata intervalelor de inspecție periodică ar trebui să reprezinte aproximativ jumătate din perioada în care fisura (sau fisurile) evoluează de la nivelul minim de detectabilitate la dimensiunea critică corespunzătoare pragului impus de nivelul rezistenței reziduale minime admise. Cea mai mare lungime a fisurii care poate rămâne nedetectată în urma unei inspecții periodice, trebuie să reprezinte dimensiunea asumată ca fisură inițială pentru următorul interval de inspecție.

Conceptul referitor la toleranța la deteriorări poate fi abordat atât din punct de vedere deterministic cât și probabilistic. În reprezentarea schematică a curbei de evoluție a lungimii unei fisuri din Figura 2.4, se poate observa că oportunitatea probabilistică de detecție se desfășoară de-a lungul unei perioade de timp în care deteriorarea evoluează începând cu pragul minim de detectabilitate a fisurii, notat cu  $a_d$ , până la nivelul critic al acesteia, notat cu  $a_{cr}$ . O mică variație de asumare a lungimii fisurii detectabile, produce o variație relativ mare a oportunității de detecție a acesteia.

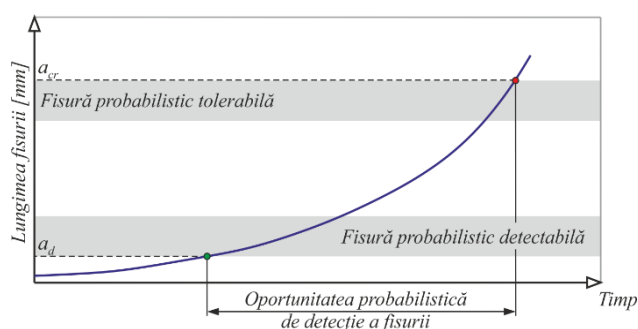
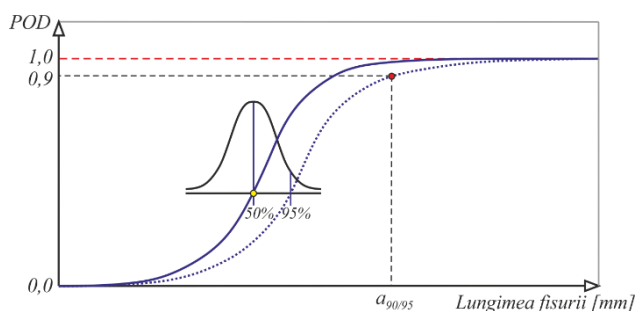


Fig. 2.4. Curba de evoluție a oportunității probabilistice de evoluție a fisurii

Exigențele evaluării siguranței și integrității structurale a produselor în general și în cazul de față a componentelor sau structurilor mecanice, impun metodelor de examinare nedistructivă detecția tuturor fisurilor care depășesc limita de acceptabilitate stabilită în faza de proiectare. Îndeplinirea unui astfel de deziderat este posibilă în măsura în care se cunoaște probabilitatea de detecție a fiecărei metode, valorile mai mari, acoperitoare, fiind cele recomandate întrucât acestea permit lungimii celei mai mici fisuri detectabile să ia o valoare inferioară

dimensiunii celei mai mari discontinuități acceptabile.

Probabilitatea de detecție, notată în literatura de specialitate cu acronimul POD (din limba eng. Probability of Detection), este indicatorul care exprimă dependența dintre detectabilitatea unei anumite discontinuități (fisuri) și lungimea acesteia. Cu alte cuvinte, probabilitatea de detecție (POD) cuantifică capacitatea unei metode de examinare nedistructivă de a detecta discontinuitățile (fisurile). O curbă POD a unei metode de examinare nedistructivă se obține prin testarea unui număr cât mai mare de componente mecanice cu discontinuități în condițiile specifice mediului de elaborare, prelucrare sau exploatare, urmată de corelarea rezultatelor cu dimensiunea fisurilor. Se poate sublinia aici că creșterea sensibilității metodei atunci când acest lucru este posibil, determină creșterea probabilității de detecție a discontinuității reale, însă în același timp și a probabilității apariției unor indicații false.



**Fig. 2.5.** Curba de variație a probabilității de detecție în funcție de lungimea fisurii

În ceea ce privește achiziția și prelucrarea semnalelor specifice diferitelor tehnici de examinare nedistructivă, trebuie menționat că acestea pot avea în funcție de natura receptorului, fie un caracter cantitativ (înălțimea ecoului de defect în cazul examinării cu ultrasunete, de exemplu), fie un caracter calitativ (cum ar fi, distribuția densității de înnegrire în cazul examinării radiografice). Este așadar evident că fiabilitatea unei metode de examinare nedistructivă este limitată de capabilitatea acesteia de a realiza discriminarea între un semnalul util și semnalul de zgomot. În cazul în care pragul de discriminare este fixat prea sus discontinuitățile pot rămâne nedetectate și probabilitatea de detecție (POD) se reduce. Dacă, în schimb, acest prag este fixat prea jos semnalul de zgomot poate fi interpretat ca semnal de discontinuitate și prin urmare probabilitatea indicației false va crește [6].

Întrucât s-a observat că discontinuitățile care au aparent aceleași dimensiuni determină un grad semnificativ de împrăștiere a semnalelor de răspuns, capabilitatea unei metode de examinare nedistructivă se exprimă statistic în termenii probabilității de

detecție (POD) ca o funcție de dimensiunea discontinuității (sau lungimea fisurii). Așa cum se prezintă schematic în Figura 2.5, curbele POD prezintă o tendință asimptotică spre o valoare egală cu unitatea, care corespunde unei probabilități de detecție de 100%. Studiul lucrărilor de referință din literatura de specialitate arată însă că din punct de vedere practic este imposibilă precizarea dimensiunii unei discontinuități pentru care probabilitatea de detecție să ia o valoare unitară. Astfel, în aplicațiile practice din domeniul construcțiilor de mașini și construcțiilor de aeronave s-a convenit ca valoarea probabilității de detecție a unei discontinuități, caracteristică unei anumite metode de examinare nedistructivă, să fie de 90%. În plus, pentru a reflecta incertitudinea statistică a rezultatelor măsurătorilor, în mod uzual se consideră un interval de încredere de 95%. Conform reprezentării grafice din Figura 2.5, în lucrările de specialitate se folosește notația  $a_{90/95}$ , reprezentând dimensiunea fisurii pentru care există un nivel de încredere de 95% ca cel puțin 90% din toate discontinuitățile de lungime „ $a$ ” să fie detectate.

## 3. TEHNICI DE ANALIZĂ ȘI METODE DE CALCUL

Având în vedere varietatea problemelor specifice diferitelor ramuri ale ingineriei, este dificil de stabilit un șablon general valabil care să poată fi aplicat pe baza unei scheme logice, cu plecare dintr-un punct inițial, parcurgerea anumitor proceduri cu un număr determinat de iterații și ramificații, care să rezolve orice problemă, de orice natură. În schimb, se poate face o ierarhizare a principalelor faze care dau curs procesului de proiectare pe baza duratei de viață, așa cum se prezintă în schema bloc din Figura 3.1.

Indiferent de specificul componentei sau structurii mecanice care face obiectul studiului de proiectare, schema de mai jos prezintă atât caracterul iterativ al procesului cât și multitudinea datelor de intrare, precum: geometria, istoricul încărcării, condițiile de mediu, criteriile sau constrângerile de proiectare, proprietățile de material și procesul de fabricație, gradul de prelucrare al suprafețelor, tratamentele termice și influența altor factori de producție, montaj și exploatare. Este așadar evident că proiectarea pe baza duratei de viață la solicitări variabile este un proces iterativ multifactorial care implică parcurgerea unor faze succesive de sinteză, analiză și testare.

În ceea ce privește faza de sinteză, aceasta constă în configurarea unui model conceptual care pune în valoare informațiile referitoare la geometria, materialul componentei, subansamblului sau structu-

rii supuse studiului și sarcinile variabile reprezentate de istoricul încărcării. La acest nivel utilizarea practicilor de proiectare asistată de calculator (Computer Aided Design), a fabricației asistate de calculator (Computer Aided Manufacturing) și a managementului datelor de produs (Product Data Management) ca părți componente ale sistemelor

integrate de management al ciclului de viață al produsului (Product Lifecycle Management), permit realizarea de prototipuri virtuale deosebit de complexe, mergându-se până la modelarea fidelă a componentei, subansamblului sau structurii supuse studiului precum și a unor condiții de funcționare specifice acestora.

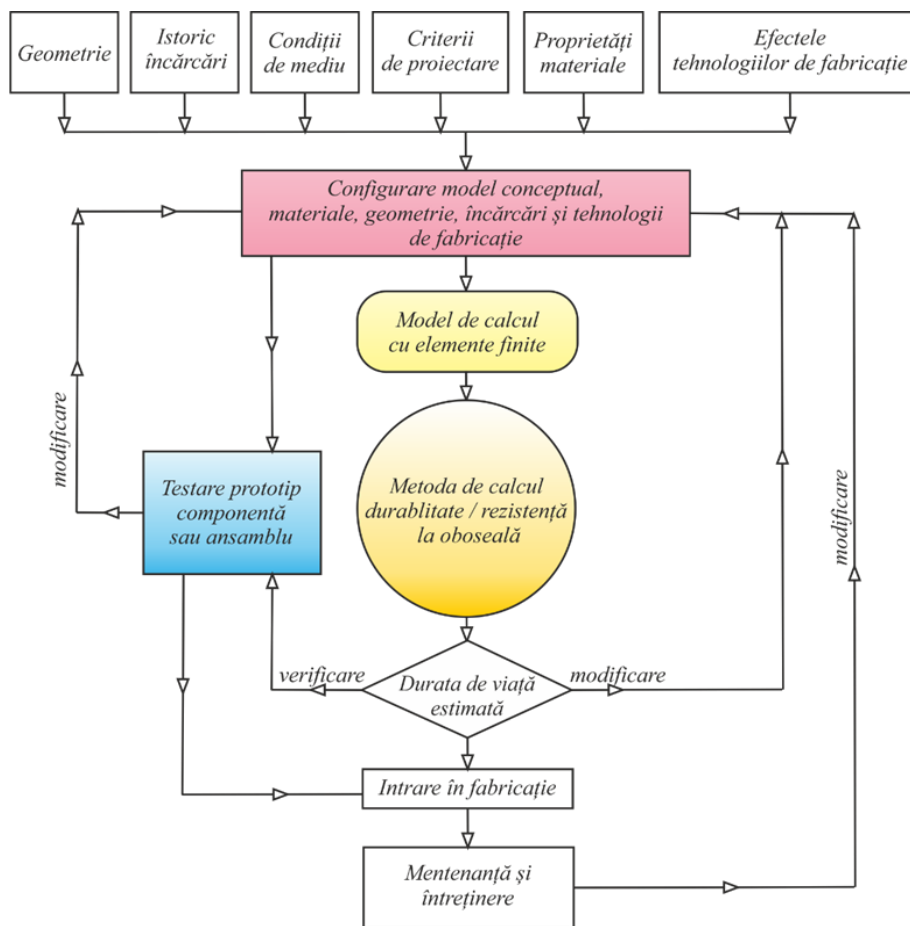


Fig. 3.1. Diagrama procesului de proiectare pe baza duratei de viață la solicitări mecanice variabile.

În cadrul fazei de analiză, rezultatele calculului cu elemente finite obținute pe un model matematic al prototipului virtual, reprezintă datele de intrare pentru următoarele etape specifice studiilor de durabilitate și rezistență la oboseală. Trebuie remarcat că eficiența și corectitudinea analizei unei structuri sau componente mecanice depinde de alegerea metodei de calcul la oboseală în strânsă concordanță cu modul de elaborare al modelului cu elemente finite, materialul, geometria structurii, istoricul încărcării, scopul proiectului și bineînțeles obiectivele avute în vedere. Pe de altă parte, alegerea unei metode adecvate de calcul depinde de informațiile de care dispune proiectantul, de specificul și de stadiul în care se găsește componenta, subansamblul sau structura studiată (în faza de proiect sau de prototip, în exploatare, etc) și nu în ultimul rând, de consecințele cedării acesteia în timpul funcționării. Este evident că precizia re-

zultatelor obținute nu o poate depăși pe cea a datelor de intrare și a modelelor de calcul utilizate. Dacă caracteristicile de rezistență și durabilitate ale materialului sunt valori medii, rezultatele vor fi tot valori medii astfel încât calculele pot conduce la estimări care diferă de realitate cu un ordin de mărime sau chiar mai mult. În general datele de material se determină prin încercări experimentale pe epruvete standardizate, după anumite protocoale de testare bine stabilite. Pentru o serie de materialele uzuale, valori medii orientative ale proprietăților de rezistență la oboseală pot fi disponibile și în literatura de specialitate, în manualele ingineresti sau în documentațiile producătorilor. Acestea trebuie însă corectate ținându-se seama de probabilitatea de cedare acceptată precum și de factorii care privesc geometria componentei sau subansamblului, tehnologia de fabricație, condițiile de exploatare și nu în ultimul rând influența factorilor de mediu. Există și

situații în care la elaborarea modelului și la alegerea metodei de calcul trebuie să se țină seama de reglementările tehnice în vigoare; norme, normative, standarde, instrucțiuni, ghiduri sau specificații, cu caracter obligatoriu sau de recomandare.

În schema bloc din Figura 3.1 se observă existența unui proces iterativ, specific fazelor de sinteză și analiză; „prototip digital - configurare model cu elemente finite - metoda de calcul durabilitate / rezistență la oboseală”, în care se realizează succesiv operații de ajustare a prototipului digital și a modelului de calcul cu elemente finite, având drept consecință modificarea stărilor de tensiuni/deformații și implicit a rezultatelor calculelor de durabilitate, în fiecare iterație aducându-se îmbunătățiri prototipului virtual până când se atinge nivelul de durabilitate urmărit. În principiu, dacă durabilitatea obținută prin calcul nu corespunde constrângerilor de proiectare impuse se poate interveni asupra a trei factori, și anume:

- solicitarea, în sensul reconfigurării soluțiilor de fixare (prindere) și a reducerii încărcărilor de exploatare preconizate;
- geometria, prin modificarea, redistribuirea sau multiplicarea căilor de transmitere a eforturilor;
- materialul, în sensul schimbării sau îmbunătățirii caracteristicilor de durabilitate și rezistență la oboseală.

Faza de testare are ca obiectiv validarea modelului și verificarea cantitativă a rezultatelor în scopul evaluării preciziei acestora. Rezultatele numerice obținute în faza de analiză și cele determinate prin încercări experimentale trebuie comparate în detaliu și analizate critic pentru a permite formularea unor concluzii bine fundamentate, pe baza cărora fie se definește proiectul, fie se îmbunătățește modelul și se continuă procesul iterativ de sinteză, analiză și testare. Cu alte cuvinte, în cazul în care rezultatele testelor experimentale conduc la concluzii nefavorabile, se operează modificări asupra modelului componente sau ansamblului mecanic supus studiului și se reintră într-un nou proces iterativ „prototip digital - configurare model cu elemente finite - metoda de calcul durabilitate / rezistență la oboseală - teste experimentale” până la obținerea nivelului de durabilitate urmărit, motiv pentru care de cele mai multe ori proiectul devine costisitor. Fie că testele experimentale sunt realizate în condiții de exploatare reală, fie prin încercări de laborator, sunt consumatoare de timp și mai mult decât atât, pentru realizarea lor sunt necesare echipamente, instalații și dispozitive speciale, materiale, manoperă și „know-how”, toate acestea contribuind substanțial la creșterea costurilor.

Studiul literaturii de specialitate arată că durabilitatea unei componente mecanice supuse unui regim de exploatare cu sarcini variabile în timp, este

determinată de numărul ciclurilor de solicitare care complinesc inițierea fisurilor de oboseală, notat în cele ce urmează cu  $N_i$ , la care se adaugă numărul ciclurilor care condiționează propagarea fisurii dominante până la ruperea sau cedarea completă, notat cu  $N_p$ , astfel [7]:

$$N_f = N_i + N_p \quad (3.1)$$

în care cu  $N_f$  s-a notat numărul total de cicluri până la rupere. În general proporția celor două componente variază în raport de nivelul de solicitare. La solicitări ciclice cu amplitudine mică cea mai mare parte a ciclurilor aplicate sunt consumate pentru inițierea fisurilor în timp ce la solicitări cu amplitudine mare, cele mai multe cicluri de solicitare corespund fazei de propagare a fisurii.

Rezultatele studiilor acumulate de-a lungul timpului asupra fenomenelor fizice care determină procesele de inițiere și propagare a fisurilor la solicitări variabile, au condus la delimitarea a două domenii de durabilitate, diferite din punct de vedere a abordării calculelor de durabilitate, și anume [7], [15]:

- oboseala la durabilități mici (în limba eng. Low Cycle Fatigue), denumită și oboseală oligociclică, este asociată unor durabilități cuprinse între  $10^2$  și  $10^3$  cicluri de solicitare, fiind specifică solicitărilor variabile cu tensiuni de amplitudini ridicate care induc în anumite zone ale materialului stări locale de deformații elasto-plastice;

- oboseala la durabilități mari (în limba eng. High Cycle Fatigue), denumită și oboseală policiclică, se consideră că intervine la peste  $10^3$  cicluri de solicitare și este specifică condițiilor de solicitare variabilă la care atât tensiunea maximă cât și amplitudinea tensiunii au valori mici comparativ cu caracteristicile statice de rezistență ale materialului.

Soluțiile tehnice care pot fi aplicate în fiecare din cele două domenii pentru sporirea duratei de viață a unei componente mecanice, subansamblu sau structuri, sunt total diferite. Dacă în domeniul durabilităților ridicate tratamentele mecanice superficiale de întărire (rulare cu role sau împroșcare cu jet de alic) sau tratamentele termochimice de suprafață (cementare, cianurare și nitrurare) sunt benefice pentru îmbunătățirea rezistenței la oboseală, acestea devin inadecvate domeniului durabilităților mici în care răspunsul materialului la solicitări variabile este influențat preponderent de caracteristicile acestuia referitoare la limita de curgere și ductilitate.

În contextul celor prezentate este evident că alegerea metodei de calcul reprezintă o decizie majoră în cadrul oricărui demers de proiectare rațională împotriva oboselii materialelor. La momentul actual studiul literaturii de specialitate relevă în principal trei abordări diferite care sunt folosite frecvent în calculele de proiectare specifice unui

spectru larg de aplicații din domeniul ingineriei mecanice, și anume:

- metoda de calcul prin analiza tensiunilor;
- metoda de calcul prin analiza deformațiilor;
- metoda tolerării defectelor prin analiza propagării fisurilor la oboseală pe baza principiilor mecanicii ruperilor.

Metoda de calcul prin analiza tensiunilor, denumită în literatura de specialitate Stress - Life, datează încă din a doua jumătate a secolului al XIII-lea, fiind adecvată studiului oboselii materialelor în domeniul durabilităților mari ( $N > 10^3$  cicluri). Conform acestei metode rezistența materialelor la oboseală este descrisă adecvat pentru necesitățile de proiectare prin curbe de durabilitate Wöhler determinate în urma încercării unor epruvete netede (fără concentrator) la solicitări ciclice de amplitudine constantă impuse prin controlul tensiunii. Cunoscută în literatură și sub denumirea de Total Life, metoda nu face diferența între faza de inițiere și cea de propagare a fisurii, prin rupere înțelegându-se separarea completă a epruvetei sau a componentei mecanice supuse la solicitări variabile. Se aplică în mod uzual în calculele de rezistență la oboseală și durabilitate a componentelor mecanice realizate din materiale metalice fără fisuri, solicitate în domeniul elastic. Metoda continuă să fie încă folosită pe scară largă datorită cunoștințelor teoretice și datelor experimentale acumulate de-a lungul timpului dar și pentru faptul că încercările mecanice pentru trasarea curbelor de oboseală nu implică costuri foarte mari. Principalul neajuns al metodei este determinat de gradul mare de dispersie al datelor experimentale, care adeseori conduce la obținerea unor rezultate mult prea conservative [8], [9], [10].

Metoda de calcul prin analiza deformațiilor, cunoscută în literatura de specialitate sub numele de Strain - Life, este adecvată studiului oboselii materialelor în domeniul durabilităților mici ( $N < 10^3$  cicluri) însă cu amplitudini ridicate ale solicitării. Conform acestei metode răspunsul materialului se descrie prin diagrame care exprimă relația între deformația specifică și durabilitate, trasate în urma unor încercări mecanice la solicitări ciclice realizate prin controlul deformației specifice. Asemănător metodei precedente, în calculul prin analiza deformațiilor se consideră că materialele din care sunt executate epruvetele sau componentele mecanice supuse studiului nu conțin fisuri inițiale. Cunoscută în literatura de specialitate și sub numele de Crack Initiation, metoda este folosită uzual în calculele de proiectare ale componentelor sau subsansamblelor mecanice pentru predicția inițierii fisurilor de oboseală când evoluția proceselor de degradare este determinată de nivelul ridicat al tensiunilor ce pot atinge limita de curgere. Chiar dacă rezultatele sunt mai puțin afectate de împrăștierea datelor experi-

mentale, care este oarecum mai redusă decât în cazul oboselii la durabilități mari, dezavantajele majore ale metodei sunt reprezentate de imposibilitatea aplicării acesteia pentru predicția durabilității până la ruperea sau cedarea finală precum și de complexitatea încercărilor necesare pentru determinarea constantelor și curbelor de material, care sunt mai costisitoare atât din punct de vedere al resurselor de timp cât și al logisticii, comparativ cu cele specifice metodei de calcul prin analiza tensiunilor [8], [11], [12], [13].

Deși din punct de vedere al rigorii metoda de calcul prin analiza deformațiilor este cea mai potrivită pentru studiul comportării pieselor sau structurilor mecanice solicitate la oboseală în condițiile apariției deformațiilor plastice, parametrul de control în calculele statice de predimensionare fiind de cele mai multe ori tensiunea locală din zona cea mai solicitată, în fazele incipiente ale proiectării sunt preferate curbele lui Wöhler ca diagrame de lucru pentru determinarea durabilității (specifice calculului prin analiza tensiunilor), întrucât acestea pot fi reprezentate într-o manieră facilă doar pe baza rezistenței la rupere statică și a valorii limitei de oboseală a materialului [14].

Dezavantajul comun al metodelor de calcul prin analiza tensiunilor și respectiv prin analiza deformațiilor este determinat evident de prezumția că materialul componentei mecanice sau structurii analizate respectă ipoteza continuității, în sensul că nu conține fisuri. În realitate fisurile există în material sub diferite forme sau mărimi (pori, incluziuni sau microfisuri) încă înaintea intrării în exploatare a oricărei componente mecanice, subsansamblu sau structurii, durata de viață a acesteia fiind de altfel determinată de viteza cu care acestea se propagă până la atingerea unui prag critic corespunzător declanșării ruperilor sau cedărilor catastrofale.

Calculul fundamentat pe analiza propagării fisurilor la oboseală, cunoscut în literatură sub denumirea de metoda tolerării defectelor are la bază principiile mecanicii ruperilor. Metoda constă în monitorizarea lungimii unei fisuri existente până la ruperea sau cedarea finală când se atinge lungimea critică, la care integritatea piesei sau structurii investigate este pusă în pericol. În ipoteza unei stări plane de deformație la vârfului fisurii, la valori ale tensiunilor situate suficient de mult sub limita de curgere a materialului, comportamentul liniar elastic al materialului la rupere se determină prin încercări realizate în mod obișnuit cu controlul tensiunii a unor epruvete prefisurate de formă specială, în urma cărora se trasează așa-numitele diagrame cinetice ale distrugerii prin oboseală. Acestea exprimă sub forma unor curbe sigmoide rata de creștere a fisurii în funcție de variația factorului de intensitate a tensiunii. Având în vedere că pentru un anumit



domeniu în care se găsește fisura, valoarea factorului de intensitate a tensiunii poate fi calculată în funcție de lungimea fisurii și condițiile de solicitare atât pe cale analitică cât și pe cale numerică prin studii de analiză cu elemente finite, pe baza curbei sigmoide specifice fiecărui material se poate determina viteza de propagare a fisurii și implicit numărul de cicluri care exprimă durata de viață remanentă până la atingerea pragului corespunzător propagării instabile. Dezavantajele metodei se datorează în principal costurilor ridicate ale instalațiilor de testare pentru determinarea curbilor sigmoide precum și impedimentelor ce pot apare în calculele de integrare analitică sau numerică. Un alt neajuns al metodei constă în imposibilitatea aplicării acesteia pentru studiul fazei de inițiere a fisurii, care, așa cum s-a arătat mai sus, în cazul oboselii la durabilități mici reprezintă cea mai parte din durata de viață [8], [10], [11].

În multe cazuri, ipoteza comportării elastice, adică utilizarea parametrilor mecanicii ruperilor liniar elastice, poate conduce la rezultate eronate. Cea mai sigură abordare a calculului este cea în care analiza se întinde de la comportarea liniar elastică până la cea total plastică, adică de la ruperea fragilă până la colapsul plastic [8], [11], [15]. Trebuie așadar precizat că la valori ale tensiunilor care depășesc suficient de mult limita de curgere a materialului există căi diferite de abordare a problemei bazate pe conceptele mecanicii ruperilor elasto-plastice (tenacitatea la rupere, deplasarea critică de deschidere a fisurii și integrala J).

#### 4. CONCLUZII

Așa cum s-a prezentat în schema bloc din Figura 3.1, studiile de analiză cu elemente finite și validarea rezultatelor prin încercări experimentale sunt etape esențiale ale proiectării pe baza duratei de viață la solicitări variabile, indiferent de modul de abordare al calculului (stress - life, strain - life sau damage tolerance). În acest context, ponderea din buget care ar trebui alocată fiecăreia din cele două etape reprezintă una din deciziile care pot afecta semnificativ costurile și rezultatele proiectului. Pe de-o parte studiile de analiză cu elemente finite pe modele cât mai detaliate necesită mai puține teste experimentale, în timp ce calculele aproximative pe modele simpliste pot fi incorecte datorită neglijării unor aspecte specifice fenomenului studiat. Consecințele directe ale unei astfel de situații sunt suplimentarea cheltuielilor pentru realizarea prototipurilor fizice și necesitatea planificării unor noi serii de încercări care determină de cele mai multe ori depășirea bugetului planificat și creșterea costurilor de proiectare. Pe de altă parte însă, modelul de calcul cu elemente finite trebuie să fie adecvat

scopului propus în sensul că un model excesiv de complicat, care își propune să aibă în vedere cât mai multe aspecte posibile ale fenomenului, poate deveni ineficient sau chiar inoperabil.

Evaluarea preciziei rezultatelor obținute în urma calculelor de durabilitate bazate pe studii de analiză cu elemente finite, reprezintă un demers esențial în ansamblul derulării proiectului. Schimbări minore aduse modelului de calcul în ceea ce privește modul ipotetic în care se apreciază comportarea structurii în condiții reale de exploatare precum și modificarea formei rețelei de discretizare, a tipurilor de elemente finite, a modului de aplicare a sarcinilor și condițiilor de contur, pot avea efecte majore asupra rezultatelor.

Ca regulă generală, elaborarea unui model de calcul și obținerea cu ajutorul acestuia a unor rezultate nu reprezintă un scop în sine, ci doar un mijloc care facilitează într-o oarecare măsură anticiparea comportării componente sau structurii sub acțiunea încărcărilor variabile. Prin urmare modelul de calcul trebuie validat pe baza unor determinări experimentale care permit verificări cantitative ale rezultatelor, în scopul evaluării preciziei acestora. Potrivit referinței [15], rezultatele testelor experimentale acoperă oricare din abordările analitice sau numerice de calcul astfel încât binecunoscuta sintagmă „experimentele nu mint niciodată” este unanim acceptată în practica calculelor de rezistență la oboseală și durabilitate. În acest context trebuie totuși menționat că un experiment poate produce doar rezultate specifice condițiilor în care s-au realizat testele. Întrebarea care se pune este dacă respectivele condiții de testare pot reprezenta realist condițiile de exploatare? Se știe că variația factorilor de mediu determină apariția unor fenomene combinate care fac obiectul unui număr însemnat de studii, analize și cercetări științifice de specialitate. Ca exemple se pot menționa fenomenele de oboseală-coroziune, oboseală-fluaj și oboseală-iradiere. Materialele metalice în general, sunt puternic influențate de mediu astfel încât comportamentul lor mecanic cunoaște modificări importante în special în funcție de temperatură, iradiere sau factorii corozivi. La temperaturi scăzute mecanismele de rupere devin diferite, aliajele metalice evoluând în general către o rupere fragilă, tendință care este contracarată însă de efectul concentratorilor de tensiuni. În aceste condiții problema principală constă în încercarea de reproducere cât mai exactă în condiții de laborator, a mediului în care va evolua componenta sau ansamblul mecanic analizat. Rezultă că pentru o proiectare judicioasă împotriva oboselii mecanice folosind studii de analiză cu elemente finite și încercări experimentale, este necesară o cunoaștere profundă a comportării la oboseală a materialelor, pieselor componente și structurilor, într-o mare

varietate de condiții specifice de mediu care pot afecta comportamentul componentei sau întregului ansamblu la sarcini variabile în timp.

### BIBLIOGRAFIE

- [1] SR EN 1999-1-3:2007, *Eurocod 9 - Proiectarea structurilor de aluminiu. Partea 1-3: Structuri care lucrează în regim de oboseală.*
- [2] Rusu, O., Teodorescu. M. *Oboseala metalelor, vol I și II*, Editura tehnică, București, 1992.
- [3] Biț, S. Cornel. *Tendențe moderne în studiul fenomenului de oboseală.* Editura Universității Transilvania din Brașov, Brașov, 2015.
- [4] STAS 6488-1992, *Solicitări variabile. Vocabular și simboluri.*
- [5] STAS 12509-86, *Metode de control nedistructiv. Clasificare și terminologie.*
- [6] Martinescu, D., Martinescu, I. *Metode Fizice de Control In Aeronautica*, Editura Lux Libris, Brașov, 2009.
- [7] Bishop, N. W, M., Sherratt, F. *Finite Element Based Fatigue Calculations.* NAFEMS, The International Association for the Engineering Analysis Community, 2000.
- [8] Pană, T.; Pastramă, Ș.D. *Integritatea structurilor mecanice.* Editura Fair Partners, București, 2000.
- [9] Palaghian, Liviu. *Siguranță, durabilitate și fiabilitate la oboseală*, Editura Tehnică, București, 2007.
- [10] Dumitru. Ion., *Bazele calculului la oboseală.* Editura Eurostampa Timișoara, 2009.
- [11] Pastramă, Ș.D. *Metode analitico - numerice în mecanica rupei.* Editura Printech, București, 2004
- [12] Jinescu V.V. *Cumulation of effects in calculating the deterioration of fatigue loaded structures*, Int. J. Damage Mech., 21, 2012.
- [13] Alămoreanu, Elena., Safta, Carmen, Anca., *Fiabilitate și metode statistice în ingineria mecanică.* Editura Printech, București, 2007.
- [14] Milella, P. P. *Fatigue and corrosion in metals*, Milan ; New York Springer, 2013.
- [15] Schijve, Jaap. *Fatigue of Structures and Materials*, Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [16] Cioclov, D. *Rezistență și fiabilitate la solicitări variabile*, Editura Facla, Timișoara, 1975.
- [17] Baba, M. N. *Proiectarea pe baza duratei de viață la solicitări variabile. Vol. 1*, Editura Universității Transilvania din Brașov, 2018.

---

### Despre autor

#### Șef lucrări dr. ing. Marius Nicolae BABA

Universitatea „Transilvania” din Brașov, Facultatea de Inginerie Mecanică, Brașov, România

Absolvent al Facultății de Ingineria Lemnului din cadrul Universității Transilvania din Brașov, în perioada 2007 - 2009 a obținut o bursă de studii în Engineering Design la Politecnico di Milano iar în anul 2010 devine doctor inginer în domeniul Inginerie Mecanică, cu specializarea Rezistența materialelor și Teoria elasticității. În paralel cu poziția de șef lucrări la Facultatea de Inginerie Mecanică din cadrul Universității Transilvania din Brașov, timp de 5 ani, în perioada 2013 - 2017, lucrează ca Senior stress engineer pentru compania Consaro Engineering, fiind membru în echipele de calcul structural pentru câteva proiecte de anvergură din domeniul construcțiilor aeorospatiale (Airbus A350, Airbus A380, Airbus A400M și Ariane 6). Este coautor la 2 brevete de invenție internaționale și 4 cărți de specialitate, director de proiect la 2 contracte naționale de cercetare științifică, precum și autor/coautor la peste 40 de articole științifice publicate în reviste de specialitate sau prezentate în cadrul unor conferințe naționale și internaționale cu tematică în domeniul calculului de rezistența materialelor, mecanicii rupei și teoriei elasticității corpurilor izotrope sau anizotrope. Începând din anul 2018 este titularul cursurilor de Rezistența materialelor I și II la programele de licență în limba engleză Automotive engineering și Industrial design, organizate de Universitatea „Transilvania” din Brașov.