

8. Prezentarea proiectului: (Max. 10 pagini)

8.1. Importanta si relevanta continutului stiintific

Prezentarea creaza referentialul cercetarii; va demonstra gradul de informare documentare al directorului de proiect

In abordarea diferitelor aspecte legate de efecte de vascozitate si plasticitate, ca un element de originalitate semnalam ca proiectul propune si o modelare constitutiva pentru materiale cu neomogenitati structurale, care presupun existenta locala a unor zone de neomogenitate a deformatiilor ireversibile, sau materiale cu proprietati plastice care contin eventuale goluri rezultate din procesele tehnologice, materiale care se pot deteriora pe masura acumularilor deformatiei plastice, etc. Materialele sunt esential disipative, ceea ce justifica determinarea compatibilitatilor termodinamice, pe procese izoterme.

I. Efectele de plasticitate sunt generate in general, de existenta unor defecte ale structurii cristaline, pentru materiale de tip metale. In cazul materialelor cu neomogenitati de tip dislocatii continu distribuite (defecte), care sunt supuse la deformatii finite, mentionam lucrarile prezentate de Teodosiu [1970], Steinmann [2002], [1997], Cleja-Tigoiu [2002], Gurtin [2004]. In aceste lucrari masura prezentei dislocatiilor in structura cristalina (microstructura) este data de existenta vectorului Burgers nenul, definit prin distorsiunea (deformatia) plastica cu rotorul nenul. In modelul propus de Cleja-Tigoiu[2002, 2007b] masura deformatiei plastice este gandita ca o pereche de ordinul doi, compusa din distorsiunea plastica (camp tensorial de ordinul doi) si din conexiunea plastica (camp tensorial de ordinul trei), cu torsiune nenula. Pe baza argumentelor din geometria diferentia la Cleja-Tigoiu [2002, 2007a] a introdus formula de descompunere a perechilor de deformatii de ordinul al doilea, in cadrul elasto-plasticitatii cu efecte de ordinul al doilea. Descompunerea multiplicativa a perechii de ordinul doi asociata miscarii, formata din gradientul deformatiei si conexiunea miscarii (care are torsiunea zero), in componentele elastice si plastice, ca perechi de ordinul doi, este echivalenta cu (1) descompunerea multiplicativa a gradientului de deformatie in distorsiunea elastica si plastica, si cu (2) formula de descompunere a conexiunii, care contine conexiunile elastice si respectiv plastice. Spre deosebire de gradientul miscarii care deriva dintr-un potential, atat distorsiunea plastica cat si cea elastica sunt incompatibile, neputand fi deduse dintr-un potential. Se poate asocia procesului de deformare a materialului o *configuratie neolonoma*, concept discutat de Acharya[2004], Bilby[1960], Schouten[1954]), configuratie pe care o vom numi *si configuratie cu torsiune*. In lucrarea Cleja-Tigoiu[2007b] a fost formulat un principiu al puterii virtuale adaptat pentru a descrie comportamentul materialelor elasto-plastice, cu forte materiale definite prin perechi (microtensiuni si micromomente de tensiuni) energetic conjugate cu vitezele de variatie ale perechii de deformatii de ordinul al doilea, dar fara a opera cu o cinematica de tip Cosserat. Fortele fizice sunt considerate ca fiind definite prin perechi formate din tensiunea Cauchy si macromomente, descrise prin campuri tensoriale de ordinul doi si respectiv de ordinul trei, acestea fiind energetic conjugate cu gradientul vitezei si gradientul de ordinul doi al vitezei. Din principiul puterii virtuale sunt deduse ecuatiile de bilant pentru fortele fizice (macro-forte), similare cu cele deduse in Fleck et al.[1994], cat si ecuatiile de bilant pentru fortele materiale (micro-forte). Prezenta micro-fortelor in principiul puterii virtuale a fost introdusa in Cleja-Tigoiu [2007b], intr-un mod similar conceptului introdus de Gurtin[2003] si adaptata cadrului constitutiv al modelarii. Mentionam prezenta legii a doua a termodinamicii pentru procese izoterme, reformulata printr-un principiu de nebilantare a energiei libere, care a fost folosita in lucrarile lui Gurtin[2003, 2004], in vederea deducerii de restrictii suplimentare asupra functiilor constitutive. In final, Gurtin[2003, 2004] formuleaza ipoteze constitutive pentru micro-forte si micromomente, forte materiale, motivate de inegalitatea disiparii. Fortele materiale contin o parte nedisipativa (dedusa din energia libera vazuta ca un potential) si o parte nedisipativa, de tip dependenta de viteza, in general vascoplastice. Teoria de corp continuu deformabil, cu dislocatii continu distribuite, isi are originile in directiile initiate de Kondo si Yuki[1958], Bilby [1960], Kröner[1963, 1992], Kröner si Lagoudas[1992] (pentru modele elastice). Fundamentarea matematica a modelarii poate fi gasita in Noll [1967] si Wang[1967] (in contextul constitutiv al materialelor simple), folosind conceptele geometriei diferentiale. Referitor la teorema de descompunere a conexiunilor cu proprietati metrice, intr-o conexiune Levy-Civita si contorsiune mentionam studiile realizate de Schouten[1954], Kondo si Yuki[1958] si aplicate in elasto-plasticitate amintim Steinmann[1994], Cleja-Tigoiu[2002a], a se vedea si cartea autorilor Beju si colab.[1979], Le si Stumpf[1999c]. Un loc aparte il ocupa teoriile de tip Cosserat, aplicate in elasto-(visco) plasticitatea cristalelor, supuse la deformatii finite si care se bazeaza pe mecanismele de alunecare in sisteme de alunecare in descrierea vitezelor de deformare plastice, de exemplu in Naghdi and Srinivasa[1994], Le si Stumpf[1996a], Steinmann[1994]. In Forest si colab.[1996], o cinematica de tip Cosserat este considerata pentru descrierea ecuatiilor constitutive si de evolutie, fiind propusa o ecuatie de evolutie si pentru tensorul torsiune-curbura, ca un element de noutate. Principii ale lucrului mecanic virtual, pentru modele elasto-plastice cu dislocatii au fost deduse de Le and Stumpf[1996b], in timp ce o analiza consistenta termodinamic pentru a descrie evolutia deteriorarii anizotrope, a fost realizata de Stumpf si Hackle[2003]. Intr-o alta lucrare, Gurtin[2000] construieste o teorie de tip gradient in plasticitatea materialor cristaline, tinand seama de prezenta dislocatiilor geometric necesare. O problema dificila, este legata de *compatibilitatea ecuatiilor* care descriu evolutia proceselor ireversibile in elasto-plasticitatea finita, cu restrictii impuse de caracteristicile procesului, de exemplu torsiune nenula dar curbura zero, conditii de compatibilitate de tip Frobenius, etc. Anumite compatibilitati geometrice sunt

discutate, de exemplu Acharia[2004], Cleja-Tigoiu[2002a], Gupta si colab.[2006], Cleja-Tigoiu et al.[2007a]. In lucrarea Cleja-Tigoiu si colab.[2007a], de exemplu, a fost dedusa restrictia impusa de existenta conexiunii plastice, cu torsiune nenula, dar curbura nula, sub forma ecuatiei cu derivate partiale pentru torsiune, pentru o metrica plastica data. Caracterul original al teoriei de crestere (printr-un model elastic de ordinul doi) dezvoltat in Epstein si Maugin[2000], consta in prezentarea ecuatiei de evolutie propusa pentru gradientul de ordinul doi. De o importanta majora sunt conditiile pe frontiere de tipul interfete ale domeniilor de deformare plastica, ce ar trebui impuse in teoriile care considera efecte ale deformarii plastice (facem trimitere la Gurtin si Needleman [2005], Gupta si colab.[2006]). Referitor la forte materiale, mentionam ecuatia pseudo-momentului propusa de Maugin [1999] si exemple de forte materiale, identificate ca forte motrice, care actioneaza pe defecte, sau J-Integrala din mecanica ruperii. Cleja-Tigoiu[2002a] extinde rezultatele din Cleja-Tigoiu[1990, 2001], Cleja-Tigoiu si Soos[1990], pentru materiale elasto-plastice cu dislocatii continuu distribuite, plecand de la ipoteze de natura fizica: (i) Materialele cu structura cristalina nu sunt omogene si relaxarea tensiunilor este posibila numai local, configuratiile local relaxate sunt compatibile, reconstituirea corpului continuu deformabil poate fi re-alizata numai prin aplicarea unei deformatii de tip elastic (reversibila). (ii) Starea locala relaxata este caracterizata printr-o structura de spatiu metric (o metrica plastica), ne-Euclidean si ne-Riemannian. (iii) Ecuatiile de bilant dinamic se refera la tensiuni Cauchy nesimetrice si cupluri de tensiuni. (iv) Comportamentul ireversibil este descris prin ecuatii de evolutie (rate independente sau de tip plastic sau respectiv de tip vascos, sau vascoplastic), incluzand prezenta gradientului distorsiunii plastice.

II. Elaborarea modelelor care descriu comportamentul plastic cuplat cu descrierea deteriorarii, se realizeaza pe doua directii, in cazul elasto-plasticitatii cu deformatii finite de ordinul intai bazat pe descompunerea multiplicativa a gradientului de deformatie si in cadrul constitutiv al elasto-plasticitatii cu efecte de ordinul doi, sub diferite variante, printre care teorii de tip gradient. Exista modele teoretice, justificate experimental, in care deteriorarea anizotropa este caracterizata printr-un tensor de deteriorare de tip deformatie (sau tensor cinematic de deteriorare), a carui existenta este legata de introducerea unor configuratii libere de tensiuni si nedeteriorate (virtuale sau fictive), a se vedea Brunig [2003]. In acest caz rolul configuratiilor relaxate, utilizate de Cleja-Tigoiu in elastoplasticitatea finita, cu descompunere multiplicativa in [1990], in Cleja-Tigoiu si Soos[1990] este jucat de configuratiile curente, libere de tensiuni, dar deteriorate. Existenta tensorului cinematic de deteriorare conduce la modificarea descompunerii multiplicative a gradientului de deformatie, dar se face ipoteza ca partea plastica a deformatiei poate afecta numai structura materialului nedeteriorat, a se vedea Brunig si Ricci [2005]. Mo-delele sunt insa incomplete, nefiind luate in considerare conditiile de compatibilitate dintre domeniile de deformare plastice (in modele de tip independente de viteza) si domeniile de deteriorare. Natura fizica a variabilelor care descriu starea de deteriorare a materialului ramane un aspect esential in modelarea fenomenologica a deteriorarii. Pe de alta, parte in modelarea plasticitatii cu deteriorare, exista directii bazate pe ipoteza existentei variabilelor scalare interne de stare. Daca se considera o deteriorare de tip izotrop, o variabila scalara de deteriorare va inlocui variabila tensoriala de deteriorare, iar descompunerea multiplicativa a gradientului de deformatie este redusa la cazul anterior. Ecuatii macroscopice de evolutie a deteriorarii, se deduc pe baze experimentale, a se vedea Brunig si Ricci[2005]. In modelare se introduc si efectele de ordinul doi, functiile constitutive care descriu, in conditia curenta de plasticitate sau de deteriorare, ecruisarea (hardening) sau inmuiera (softening) materialului. De Borst si colab.[1999], Askes si colab.[2000], Pamin si colab.[2003] prezinta modele unidimensionale pentru materiale plastice cu deteriorare cuplata sau necuplata, care includ efecte de ordinul doi. In ultimele lucrari nu sunt evidentiate insa conditiile care au fost considerate in modelarea numerica, pe frontierele domenii-lor in care materialul manifesta un comportament nelocal. Intr-o categorie aparte, cu variabile de deteriorare de tip tensiune, poate fi considerata lucrarea prezentata de Lubarda si Krajcinovic[2007].

III. Metode numerice si implementarea acestora in contextul comportamentului ireversibil al materialelor, incluzand mo-dele elasto-plastice cu deformatii infinitesimale si finite, sunt dezvoltate in cartea autorilor Simo si Hughes[2000], precum si in Simo[1998]. Descrierea constitutiva a modelelor prezentate, pentru care au fost elaborate metodele numerice de integrare si algoritmi numerici, este prezentata in paragrafele anterioare expunerii metodelor numerice, lucrarea fiind auto-continuta. Solutiile numerice pentru problemele neliniare, cu date initiale si pe frontiera, formulate in mecanica solidelor, care contin si raspunsul ireversibil al materialului, se bazeaza pe solutiile *incremental-iterative* ale unor reprezentari discrete pentru ecuatiile de bilant, corespunzand aproximatiei numerice utilizate, de fapt metode de tip element finit sau de diferente finite. In majoritatea procedurilor numerice (computationale) folosite, forma slaba a termenului de tip divergenta a tensiunii este evaluata printr-un procedeu de cuadratura numerica, in timp ce ecuatiile de evolutie care definesc raspunsul ireversibil sunt impuse local ca un sistem de ecuatii diferentiale in fiecare punct de cuadratura, facem referire la Simo [1998]. Integrarea in timp a acestui sistem local poate fi privita ca o problema centrala a plasticitatii computationale, deoarce ea corespunde rolului jucat de ecuatiile constitutive intr-un cadru general computational. Punctul cheie al acestei probleme consta in faptul ca aceasta solutie poate fi privita ca un algoritm generat de deformatie, in sensul ca variabilele interne de stare sunt calculate pentru o istorie de deformatie data. Problemele cuasi-stactice de tip rate-dependente conduc la inegalitati variationale stationare pentru campurile necunoscute de viteze si factor plastic. Pentru a rezolva aceste inegalitati au fost dezvoltate metode

computationale in Glowinski si colab.[1976]. Cand factorul plastic este nul pestetot, pentru un anume interval de timp, inegalitatile variationale corespund unei inegalitati variationale simetrice ce apare in elasticitate. Intr-o problema simpla, in Cleja-Tigoiu[1996], a fost dedusa inegalitatea variationala nesimetrice si au fost puse in eviden-ta ramurile bifurcate ale solutiei (viteza si factorul plastic) inca de la inceputul aparitiei deformatiei plastice. Metoda elementului finit (FEM), a se vedea de exemplu Borst *et al* [1999], este o metoda numerica naturala folosita pentru rezolva-rea problemelor cu date pe frontiera din mecanica solidelor, ca de exemplu problema care corespunde plasticitatii cu efecte de tip gradient sau corespunzatoare plasticitatii cuplate cu deteriorare si care rezulta din formularea variationala a problemei studiate. Alternativ, metoda elementelor-libere de tip Galerkin (EFG), care este o varianta de metoda fara retea, a fost folosita de Askes si colab.[2000] in scopul analizei structurilor descrise prin modele de deteriorare, care includ gradienti. Recent, Pamin si colab.[2003] au extins aceste proceduri numerice la doua modele de teorie de plasticitate cu gradienti, care anterior au fost modelate prin FEM.

Bibliografie selectiva:

- Acharya A (2004) Constitutive analysis of finite deformation field dislocation mechanics. *J. Mech.Phys.Solid* 52:301-316.
- H. Askes, J. Pamin, R. de Borst, Dispersion analysis and element-free Galerkin solutions of second- and fourth-order gradient-enhanced damage models, *Int. J. Numer. Meth. Mech. Engng* 49 811-832, 2000.
- Bilby B A (1960) Continuous distribution of dislocations. In: Sneddon I N, Hill R (eds) *Progress in Solid Mechanics*, North-Holland, Amsterdam p. 329-398.
- Beju I, Soos E, Teodorescu P P (1983) Spinor and non-Euclidean tensor calculus with applications. Ed.Tehnica, Bucuresti Romania, Abacus Press, Tunbridge Wells, Kent, England (Editie romana 1979)
- Brunig, M. (2003) An anisotropic ductile damage model based on irreversible thermodynamics, *Int.J. of Plasticity*, 19, 1679-1713 (2003).
- Bruning M, Ricci S (2005) Nonlocal continuum theory of an isotropically damaged metals. *Int J Plast* 21:1346--1382
- Cleja-Tigoiu S (1990) Large elasto-plastic deformations of materials with relaxed configurations- I.Constitutive assumptions, II. Role of the complementary plastic factor. *Int J Engng Sci* 28:171-180, 273-284.
- Cleja-Tigoiu S (1996) Bifurcations pf homogeneous deformation of the bar in finite elasto-plasticity, *Eur. J. of Mech., A/Solids*, 15, 5, 761-786.
- Cleja-Tigoiu S (2000) Anisotropic and dissipative finite elasto-plastic composite, *Red.Sem.Mat.Univ.Pol.Torino*,59:69-82.
- Cleja-Tigoiu S (2001) A model of crystalline materials with dislocations. In Cleja-Tigoiu S, Tigoiu V (eds) *Proc. 5-th Int Sem Geometry Continua and Microstructures*, Sinaia, Romania, September 2001, p 25-36.
- Cleja-Tigoiu S (2002.a) Couple stresses and non-Riemannian plastic connection in finite elasto-plasticity. *ZAMP* 53:996-1013.
- Cleja-Tigoiu S (2002.b) Small elastic strains in finite elasto-plastic materials with continuously distributed dislocations. *Theoretical and Applied Mechanics* 28-29:93-112.
- Cleja-Tigoiu S, Fortunee D, Vallee C (2007.a) Torsion equation in anisotropic elasto-plastic materials with continuously distributed dislocations. *Math Mech Solids* (in press)
- Cleja-Tigoiu S, (2007.c) Anisotropic Elasto-plastic Model for large Metal Forming Deformation Preocesses. *Int. J. of Forming Processes*.10, 1., 67-87.
- Cleja-Tigoiu S, (2007.d) Model of elastoplastic material with continuously distributed dislocations (Eulerian description) *Analele Univ. Bucuresti, matematica, LVI*, pp. 261-280
- Cleja-Tigoiu S, O.Cazacu and V. Tigoiu, (2008) Dynamic expansion of a spherical cavity within a rate-dependent compressible porous material, *Int. J. of Plasticity*, vol 24/5 pp 775-803.
- Cleja-Tigoiu S, Maugin G A (2000) Eshelby's stress tensors in finite elastoplasticity. *Acta Mechanica* 139:231--249
- Cleja-Tigoiu S, Soos E (1990) Elastoplastic models with relaxed configurations and internal state variables. *Appl Mech Rev* 43:131-151.
- R. de Borst, J. Pamin, M.G.D. Geers, (1999) On coupled gradient-dependent plasticity theories with a view to localization analysis, *Eur. J. Mech. A/Solids* 18 939-962.
- Epstein M, Maugin G A (2000) Thermomechanics of volumetric growth in uniform bodies. *Int J Plast* 16:951—978.
- Ekh M., Lillbacka R. and Runesson K. (2004) A model framework for anisotropic damage coupled to crystal (visco) plasticity. *Int. J. Plast.*, 20, 2143--2159.
- Fleck N A, Muller G M, Ashby M F, Hutchinson J W (1994) Strain gradient plasticity: theory and experiment. *Acta Metall Mater* 42:475-487.
- Forest S, Cailletand G, Sievert R (1997) A Cosserat theory for elastoviscoplastic single crystals at finite deformation. *Arch Mech* 49(4):705-736.
- Glowinski R, Lions J.L and Tremolieres R (1976) *Analyse numerique des inequations variationelles*, tome I, Dunod, Paris.
- Gupta A, Steigmann D, Stolken J S (2006) On the evolution of Plasticity and Incompatibility. *Math Mech Solids*. online: doi

10.1177/1081286506064721

- Gurtin M E (2000) On the plasticity of single crystal: free energy, microforces, plastic-strain gradients. *J Mech Phys Solids* 48:989-1036.
- Gurtin M E (2002) A gradient theory of single-crystal viscoplasticity that accounts for geometrically necessary dislocations. *J Mech Phys Solids* 50:5-32
- Gurtin M E (2003) On a framework for small-deformation viscoplasticity: free energy, microforces, strain gradients. *Int J Plast* 19:47-90.
- Gurtin M E (2004) A gradient theory of small-deformation isotropic plasticity that accounts for the Burgers and for dissipation due to plastic spin. *J Mech Phys Solids* 52:2545-2568
- Gurtin M E, Needleman A (2005) Boundary conditions in small-deformation, single-crystal plasticity that account for the Burgers. *J Mech Phys Solids* 53:1—31.
- Hansen N.R. and Schreyer Lothe H.L. (1994) A thermodynamic consistent framework for theories of elastoplasticity coupled with damage. *Int. J. Solid Struct.*, 31, 359--389.
- Kondo K, Yuki M (1958) On the current viewpoints of non-Riemannian plasticity theory. In RAAG memoirs of the unifying study of basic problems in engng and physical sciences by means of geometry {II} (D), Tokyo, 202-226.
- Kroner E (1963) On the physical reality of torque stresses in continuum mechanics. Gauge theory with disclinations. *Int J Engng Sci* (1):261—278.
- Kroner E, Lagoudas D C (1992) Gauge theory with disclinations. *Int J Engng Sci* 30:1849-1857.
- Kroner E (1992) The internal mechanical state of solids with defects. *Int J Solids Struct* 29: 1849--1857.
- Le K C, Stumpf H (1996a) A model of elastoplastic bodies with continuously distributed dislocations. *Int J Plast* 12 (5):611-627.
- Le K C, Stumpf H (1996b) Nonlinear continuum with dislocations. *Int J Engng Sci* 34:339--358.
- Le K C, Stumpf H (1996c) On the determination of the crystal reference in nonlinear continuum theory of dislocation. *Proc Roy Soc London A*452:359- 371.
- Lubarda, V.A, Krajcinovic,D. (2007), Some fundamental issues in rate theory of damaged elastoplasticity, *Int.J. Plasticity*.
- Maugin G A (1999) The thermomechanics of nonlinear irreversible behaviors. World Scientific.
- Naghdi P M, and A.R. Srinivasa A R (1994) Characterization of dislocations and their influence on plastic deformation in single crystal. *Int J Engng Sci* 32(7):1157--1182
- Noll W (1967) Materially uniform simple bodies with inhomogeneities. *Arch Rat Mech Anal* 27:1—32.
- J. Pamin, H. Askes, R. de Borst, (2003) Two gradient plasticity theories discretized with the element-free Galerkin method, *Comput. Meth. Appl. Mech. Engng* **192** 2377-2403.
- Schouten J A (1954) Ricci-Calculus. Springer-Verlag/ Berlin. Gottingn. Heidelberg .
- Simo si Hughes (2000) Computational Inelasticity, Interdisciplinary Applied mathematics, vol 7, Springer.
- J.C. Simo, Numerical Analysis and Simulation of Plasticity. In: *Handbook of Numerical Analysis, Vol. VI* , P.G. Ciarlet, J.L. Lions, Eds., Elsevier, Amsterdam, 1998.
- Steinmann P (1994) A micropolar theory of finite deformation and finite rotation multiplicative elastoplasticity, *Int J Solids Struct* 31:1063—1084.
- Steinmann P (1997) Continuum theory of dislocations: impact to single cristal plasticity. In: Owen D R J, Onate E, Hinton E (eds) *Computational Plasticity, Fundamental and applications*, CIME, Barcelona
- Steinmann P (2002) On spatial and material settings of hyperelastostatic crystal defects. *J Mech Phys Solids* 50:1743-1766
- Stumpf H, Hackle K (2003) Micromechanical concept for analysis of damage evolution in thermo-viscoplastic and quasi-brittle materials. *Int J Solids Struct* 40:1567--1584
- Teodosiu C (1970) A dynamic theory of dislocations and its applications to the theory of the elastic- plastic continuum. In: Simmons J A, de Witt R, Bullough R (eds) *Fundamental Aspects of Dislocation Theory*, Nat Bur Stand (U.S.), Spec. Publ. 317, II p 837 – 876
- Tigoiu V. and Corina Cipu, Non-newtonian fluid flows in a falling cylinder viscometer, Proceedings of "STAMM'2004" Symposium, Darmstadt, 22-28.08.2004, pp. 559 – 568, Shaker Verlag, 2005a
- Tigoiu V. and Corina Cipu, Flow of some viscoelastic fluids in a falling cylinder viscometer and the evaluation of shear viscosity, "New Trends in Continuum Mechanics", Edited by M.Suliciu, EURROMAT- International Conference, Constanța, septembrie 2003, Ed. Theta, București, 2005b, pp. 311-320
- C.C. Wang C C (1967) On the geometric structure of simple bodies, a Mathematical foundation for the theory of continuous distributions of dislocations. *Arch Rat Mech Anal* 27:33-94

8.2. Obiectivele proiectului

(se specifica clar obiectivele proiectului in contextul stadiului cunoasterii in domeniu, elementele originale vizate si importanta pentru domeniu, impactul estimat al proiectului; daca este cazul se va face referire la caracterul interdisciplinar)

- 1) - analiza si descrierea calitativa a **evolutiei anizotropiei plastice**, manifestata prin **anizotropia orientationala**, dezvoltata si evidentiata experimental in materiale elasto-plastice cu anizotropie initiala, ca urmare a acumularii deformatiei ire-versibile (plastice).
- 2)- elaborarea de modele constitutive pentru a descrie **deteriorarea ductila**, efect al plasticitatii (al ne-elasticitatii) in comportamentul materialului, bazate pe existenta unui criteriu de deteriorare si a potentialului de deteriorare pentru materiale de ordinul doi, cu variabile scalare de deteriorare.
- 3)- formularea matematica a **problemelor variationale si a inegalitatilor variationale** specifice pentru modele elasto-plastice, cu deteriorare, in cazul deformatiilor finite.
- 4)- extinderea si **implementarea procedurilor numerice** propuse de Borst si colab.[1999], Askes si colab.[2000], Pamin si colab.[2003] pentru deformatii infimezimale, la clase de materiale cu efecte de ordinal doi si supuse la deformatii finite, cu considerarea unor modele matematice de plasticitate si deteriorare, cuplate si respectiv necuplate.
- 5)- elaborarea cadrului constitutiv pentru materiale elasto-plastice care prezinta **neomogenitati structurale** specificate prin masuri **de ordinul doi ale deformatiei plastice**, cu natura disipativa descrisa printr-un **principiu de nebilantare a energiei libere**, deteriorarea fiind considerata prin dependenta energiei libere de conexiunea plastica de tip Levi-Civita.
- 6)- reprezentari constitutive pentru **fortele materiale**, ca elemente specifice in cadrul constitutiv al materialelor cu neomogenitati structurale (de tip existenta a zonelor deteriorate), care contin pe langa partea nedisipativa (derivata din functia de energie libera considerata ca potential al fortelor) si o parte nedisipativa, **de natura esential vascoasa**, sugerata de inegalitatea de disipare.
- 7)- prezentarea modelelor de deteriorare a materialelor cu neomogenitati, rezultate prin considerarea in modelare a efectelor de ordinul doi al deformatiei plastice, **de tip rate-independente**, motivate de ne-bilantarea energiei interne in conexiune cu modelele vascoplastice mentionate anterior.
- 8)- studiul efectului vascozitatii asupra miscarii unor fluide ne-newtoniene in domenii cu geometrii variate (a se vedea Tigoiu si Cipu [2005a, 2005b]), realizate in vederea elaborarii modelelor Euleriene.
- 9) – elaborarea modelelor Euleriene (descriere spatiala) in cadrul constitutiv al materialelor cu **neomogenitati structurale**, ca un efect de vascoplasticitate si comparatii cu modelul in descriere Euleriana dezvoltat in Cleja-Tigoiu [2007d].
- 10)- elaborarea **unor algoritmi numerici pentru rezolvarea problemelor** cu date initiale si la limita, in formularea de tip rate (diferential) asociata unui stadiu generic al procesului si care conduc la **inegalitati variationale**.
- 11)- interpretarea numerica a rezultatelor teoretice, in rezolvarea unor probleme concrete, cu evidentiarea efectelor plastice in descrierea comportamentului materialelor, tinand seama si de posibilele neomogenitati structurale existente la nivel de microstructura.

8.3. Metodologia cercetarii

Proiectul este unitar: obiectivele (1) si (2) pot fi regasite in (5) prin particularizari; obiectivele (6) si (7) vizeaza doua reprezentari posibile pentru fortile materiale, ca elemente specifice ale cadrului constitutiv al materialelor cu neomogenitati structurale. Folosim, in general, tehnici de geometrie diferentiala, de analiza functionala, de analiza numerica, de mecanica mediilor continue deformabile, pentru deformatii finite sau pentru descrieri euleriene, de tip fluid.

A. Relativ la partea de modelare

- Vom formula **reprezentari constitutive de tip diferential** pentru materiale elasto-plastice cu anizotropie de corp ortotrop, in cazul deformatiilor finite, in procese de deformare omogene, atat **pentru stari de deformatie plana cat si de tensiune plana**, in vederea studiului evolutiei anizotropiei orientationala, ca efect al acumularii deformatiei plastice). Spinului plastic nenul este elementul cheie in dezvoltarea anizotropiei orientationala si in consecintele rezultate privind comportamentul materialelor tridimensionale arbitrare pentru directiile de simetrie materiala. Cadrul constitutiv este cel al materialelor elasto-plastice cu configuratii relaxate si variabile interne de stare, propus de Cleja-Tigoiu [1990], Cleja-Tigoiu si Soos. Se vor utiliza diferite modalitati de reprezentare constitutiva, pornind de la reprezentari in raport cu configuratiile mobile, relaxate, prin metodologia prezentata de Cleja-Tigoiu si Maugin [2000].

- Modelele constitutive cu deteriorare se elaboreaza in cadrul elasto-plasticitatii de ordinul doi, considerandu-se numai variabile scalare de deteriorare. Se evidentiaza **efectele de plasticitate sau vascoase**, iar modelele sunt deduse prin comparare cu datele

de natura experimentală, existente în literatura de specialitate și care au fost publicate cu precădere în Int. J. of Plasticity.

- Restricțiile impuse de principiul de ne-bilantare a energiei libere se vor deduce utilizând metodologia originală introdusă de Cleja-Tigoiu în [2007b], pe baza principiului puterii virtuale și a inegalității de disipare, sunt incluse forțele materiale (sau configuraționale de tip Gurtin), forțe care sunt energetic conjugate cu vitezele de variație ale deformației plastice de ordinul doi. Pe de altă parte folosim rezultatele (de geometrie diferențială, ne-Riemanniană) referitor la **teorema de descompunere a conexiunii plastice**, de tip Scouten [1954] pentru conexiuni cu proprietate de metricitate, cât și teorema de descompunere a conexiunii cu torsiunea Cartan nenulă și cu curbura Riemann nenulă, într-o variantă originală sugerată de rezultatul demonstrat de Cleja-Tigoiu și colab.[2007a], care se referă la conexiuni de tip Bilby[1960] (cu curbura nulă). Originalitatea constă în considerarea efectelor introduse de conexiunea plastică cu tensorul de curbura de ordinul 4 nenul, deci o conexiune de tip Kondo [1958].
- Reprezentarea diferitelor tipuri de deteriorare, va fi descrisă prin posibilele modele sugerate de Brunig și colab.[2003], [2005], de asemenea Ekh și colab.[2004], Hansen și colab.[1994], atât pentru deteriorarea anizotropă cât și pentru deteriorarea isotropă. Vom ține seama și de efectele nelocale, în conexiune cu modelele dezvoltate pentru materiale elasto-plastice cu dislocații distribuite în mod continuu, prezentate în articolele Cleja-Tigoiu[2002a], Cleja-Tigoiu[2002b], Gurtin[2002].
- Elaborarea modelelor Euleriene pentru materiale cu neomogenități structurale, esențial vascoase și disipative, necesită comparații cu modele de tip fluide ne-newtoniene în vederea formulării de modele concrete și se bazează pe metodologia din mecanica fluidelor (a se vedea în acest sens și reușita modelării utilizate în Cleja-Tigoiu și colaboratorii [2008]).
- Realizarea studiului privind efectul vascozității asupra mișcării unor fluide ne-newtoniene în domeniul cu geometrii variate (a se vedea Tigoiu și Cipu[2005a, 2005b]), va fi realizată în vederea elaborării modelelor Euleriene. Se vor face comparații și cu modelele reologice de fluide ne-newtoniene, în vederea analizei efectelor de vascozitate rezultate prin considerarea tipului de derivată obiectivă, specifică, adăpată în model.

B. Relativ la partea de modelare numerică:

- Bazându-ne pe modelul matematic construit și utilizând formularea (slabă) variațională, vom extinde și vom implementa procedurile numerice ale lui Borst și colab.(1999), Askes și colab.(2000) și Pamin și colab.(2003) elaborate pentru deformări infinitesimale, în cazul modelelor de plasticitate finită (mari deformări) cu deteriorare izotropă, cu considerarea gradientilor de ordinul doi.
- Vom deduce **inegalitățile variaționale** în configurația actuală, care sunt asociate formulărilor de tip rate (diferențial, incremental) pentru problemele cuasi-stactice, cu date inițiale și la limită, definite pentru stadiul generic al procesului. Construcția matematică se bazează pe formalismul lui Noll [1965] *de descriere relativă* a mișcării corpurilor deformabile și adaptează metodologia dezvoltată de Nguyen[1998] și Cleja-Tigoiu[2000], pornind de la ecuația de bilanț a impulsului reprezentată prin tensiunea nominală și folosind reprezentarea constitutivă elasto-plastică într-o descriere de tip diferențial. În proiectul propus ne reducem la modele care nu iau în considerare efectele nelocale, de ordinul al doilea, reprezentate prin câmpuri tensoriale. Menționăm că vom formaliza inegalitățile variaționale, care corespund cazurilor extreme, plasticitate fără deteriorare și cazul deteriorării ductile, în care se introduc criteriul de deteriorare și respectiv potențialul de deteriorare, ca efect al plasticității, al ireversibilității comportamentului materialului.
- Pornim de la formularea variațională a problemelor, discretizarea sistemelor de ecuații cu derivate parțiale, a condițiilor la frontieră și ținând seama de condițiile inițiale, obținem forma discretă a problemelor studiate. Utilizând diversele funcții test disponibile în literatura, forma discretă a problemelor revine la analiza FEM a acestora, convergența, stabilitatea numerică și acuratețea algoritmilor urmând a fi investigate. În acest context formulările clasice FEM vor fi adaptate pentru a lua în considerare inegalitățile variaționale formulate.
- Vom elabora **algoritmi numerici pentru rezolvarea problemelor** cu date inițiale și la limită, în formularea de tip rate (diferențial) asociată unui stadiu generic al procesului și care conduc la **inegalități variaționale**.
- Analiza influenței referitelor condiții la limită asupra soluțiilor, condițiile la limită nefiind totdeauna explicite.