

UTILIZAREA PET-URILOR ÎN COMPOZIȚIA ASFALTULUI

REZUMAT

Infrastructura rutieră constituie un pilon fundamental al progresului economic și social al unei națiuni, având un rol esențial în asigurarea mobilității populației, facilitarea transportului de mărfuri și consolidarea conexiunilor între diverse regiuni. În contextul actual, rețeaua de drumuri din România se confruntă cu limitări semnificative, fiind insuficient dezvoltată și, în multe cazuri, învechită din punct de vedere tehnic și funcțional. Această situație impune adoptarea unor soluții moderne și eficiente, capabile să satisfacă atât cerințele crescânde de performanță, cât și imperativele de protecție a mediului. O direcție promițătoare în acest sens o reprezintă integrarea materialelor reciclate în compoziția mixturilor asfaltice, o practică sustenabilă care contribuie la reducerea impactului asupra mediului și la prelungirea duratei de viață a structurilor rutiere. Dintre aceste materiale, fibrele de polietilen tereftalat (PET) se disting prin potențialul lor ridicat de reutilizare. PET-ul, un polimer sintetic utilizat pe scară largă și dificil de descompus în mod natural, prezintă proprietăți fizico-mecanice valoroase, care îl recomandă pentru aplicații ingineresti, în special în domeniul construcțiilor rutiere. Valorificarea acestui tip de deșeu plastic în infrastructura de transport poate reprezenta o soluție inovatoare și durabilă, adaptată cerințelor tehnice actuale și provocărilor ecologice ale secolului XXI.

La scară globală, producția de materiale plastice a înregistrat o expansiune rapidă în ultimele decenii, depășind pragul de 350 de milioane de tone anual. O proporție considerabilă din această cantitate este reprezentată de polietilen tereftalatul (PET), un material utilizat cu precădere în industria ambalajelor, în special pentru fabricarea recipientelor pentru băuturi și produse alimentare (European Court of Auditors, 2020). Cu toate acestea, doar un procent redus din totalul acestor materiale plastice este supus proceselor de reciclare, în timp ce restul ajunge, în proporții alarmante, fie în depozite de deșeuri, fie este incinerat sau dispersat necontrolat în mediu. Persistența plasticului în natură, unde poate rămâne nedegradat timp de sute de ani, generează consecințe negative semnificative asupra mediului înconjurător și asupra resurselor naturale. Ecosistemele acvatice sunt printre cele mai afectate, întrucât deșeurile plastice, odată fragmentate, contribuie la formarea microplasticilor – particule minuscule care pătrund în lanțurile trofice, perturbând echilibrul ecologic și afectând biodiversitatea. Această situație impune identificarea unor soluții sustenabile de valorificare a deșeurilor plastice, precum reutilizarea PET-ului în aplicații ingineresti, cu scopul reducerii impactului ecologic și al

promovării unei economii circulare eficiente (Nuno și colab., 2025).

În același timp, sectorul construcțiilor rutiere continuă să se numere printre cei mai mari consumatori de resurse tradiționale, precum agregatele naturale și bitumul. Costurile asociate extracției, prelucrării și transportului acestor materiale sunt într-o continuă creștere, în timp ce rezervele disponibile sunt finite și supuse unei presiuni tot mai mari. În acest context, valorificarea materialelor reciclate ca alternativă parțială la resursele convenționale nu mai reprezintă doar o opțiune sustenabilă, ci devine o necesitate strategică. Astfel, utilizarea fibrelor din polietilen tereftalat (PET) în compoziția mixturilor asfaltice se conturează ca o soluție inovatoare cu beneficii multiple. Pe de o parte, aceasta permite reintroducerea în circuitul economic a unei categorii semnificative de deșeuri plastice greu degradabile, contribuind la diminuarea impactului asupra mediului. Pe de altă parte, numeroase studii experimentale au evidențiat faptul că includerea fibrelor de PET în structura asfaltului poate conduce la ameliorarea unor proprietăți esențiale ale acestuia – în special rezistența la apariția fisurilor, stabilitatea la temperaturi ridicate și comportamentul general în condiții de trafic intens. Prin urmare, această abordare aduce atât avantaje ecologice, cât și îmbunătățiri tehnice relevante pentru durabilitatea și performanța infrastructurii rutiere.

Prezenta cercetare se aliniază direcțiilor contemporane promovate la nivel internațional în domeniul economiei circulare și al sustenabilității materialelor utilizate în construcții. Obiectivul principal al studiului constă în evaluarea posibilității de integrare a fibrelor din polietilen tereftalat (PET) reciclat în compoziția mixturilor asfaltice, având drept scop atât îmbunătățirea performanțelor fizico-mecanice ale acestora, cât și reducerea impactului negativ asupra mediului înconjurător. Demersul științific este fundamentat pe o metodologie experimentală riguroasă, care permite investigarea comportamentului mecanic al mixturilor modificate cu PET în condiții variate de sollicitare. Această componentă practică este susținută de o analiză teoretică aprofundată, în care sunt reunite și interpretate contribuții relevante din literatura de specialitate, cu scopul de a fundamenta ipotezele de lucru și de a contura direcții de cercetare cu caracter inovator. Prin această abordare integrată, lucrarea își propune să contribuie la dezvoltarea de soluții sustenabile și eficiente pentru domeniul infrastructurii rutiere moderne.

Din perspectivă istorică, materialele plastice au cunoscut o dezvoltare accelerată începând cu secolul al XX-lea, evoluție marcată de descoperirea bachelitei de către Leo Baekeland în anul 1907 – primul plastic sintetic complet. Ulterior, pe fondul progreselor în domeniul chimiei polimerilor, au fost introduși pe scară largă diverși compuși sintetici precum policlorura de vinil (PVC), polietilena (PE) și polietilen tereftalatul (PET), fiecare contribuind

la extinderea aplicațiilor industriale ale plasticului. PET-ul, în mod particular, a fost sintetizat pentru prima dată în anul 1941 de către chimiștii britanici John Rex Whinfield și James Tennant Dickson, în cadrul companiei Calico Printers' Association. Cu toate acestea, abia începând cu anii 1970, acest material a cunoscut o expansiune globală semnificativă, datorită unui set de proprietăți fizico-chimice deosebit de avantajoase: densitate redusă, rezistență ridicată la impact, transparență optică bună și o eficiență sporită ca barieră împotriva gazelor și vaporilor de apă (Krantzberg și colab., 2023). Aceste caracteristici au condus la o adoptare rapidă a PET-ului, în special în industria ambalajelor pentru băuturi carbogazoase, apă potabilă, produse alimentare, precum și în domeniul textil, sub forma fibrelor de poliester.

Cu toate acestea, extinderea masivă a utilizării PET-ului a generat, în paralel, provocări semnificative din punct de vedere ecologic. Datorită stabilității sale chimice ridicate, acest material este practic nedegradabil în mediul natural, având nevoie de sute de ani pentru a se descompune complet. Deși PET-ul este teoretic reciclabil, în practică, rata de reciclare rămâne relativ scăzută în numeroase țări, inclusiv în România, din cauza unor factori precum lipsa infrastructurii adecvate, costurile procesării și gradul redus de conștientizare a populației. În acest context, revalorificarea PET-ului sub forma fibrelor utilizabile în domeniul construcțiilor rutiere apare ca o soluție promițătoare, capabilă să transforme un material considerat deșeu într-o resursă cu valoare adăugată. Această abordare are potențialul de a schimba fundamental paradigma actuală privind gestionarea deșeurilor plastice, oferind o alternativă fezabilă atât din punct de vedere economic, cât și din perspectivă ecologică. Integrarea fibrelor de PET în mixturile asfaltice nu doar că reduce presiunea asupra mediului, dar contribuie și la dezvoltarea unor infrastructuri rutiere mai durabile și mai eficiente.

În cadrul literaturii de specialitate sunt descrise în mod frecvent două metode principale de incorporare a materialului plastic reciclat în compoziția mixturilor asfaltice: metoda *umedă* și metoda *uscată*. Metoda umedă presupune topirea plasticului și amestecarea acestuia direct cu bitumul, în vederea obținerii unui liant modificat cu proprietăți îmbunătățite. În schimb, metoda uscată constă în introducerea plasticului sub formă solidă – de obicei fulgi, granule sau fibre – în amestecul de agregate, înainte de adăugarea liantului bituminos. În cazul specific al polietilen tereftalatului (PET), metoda uscată se dovedește a fi mai adecvată, având în vedere punctul său ridicat de topire, situat peste 250°C. Această temperatură depășește intervalul obișnuit de procesare a bitumului, ceea ce face ca topirea directă a PET-ului în cadrul metodei umede să fie nepractică sau chiar problematică. Prin urmare, utilizarea PET-ului sub formă de fibre prin metoda uscată permite integrarea sa eficientă în structura mixturii asfaltice, fără a necesita transformări termice majore. În această formă, fibrele de PET acționează ca elemente

de armare internă, contribuind la sporirea coeziunii amestecului și la inhibarea formării și propagării microfisurilor, cu impact direct asupra durabilității și comportamentului mecanic al materialului rutier (Willis și colab., 2020; Usman și colab., 2024).

Un element central al metodologiei experimentale a fost reprezentat de analiza comparativă efectuată asupra a patru tipuri de mixturi asfaltice, diferențiate atât prin natura agregatelor utilizate, cât și prin prezența sau absența fibrelor de PET. Astfel, au fost realizate două serii de mixturi pe bază de agregate provenite din carieră și două pe bază de agregate din balastieră, fiecare dintre acestea fiind preparată în variantă martor (fără aditivi) și în variantă modificată, prin adăugarea fibrelor de polietilen tereftalat în proporții variabile. Acest design experimental a permis o evaluare sistematică și obiectivă a influenței fibrelor de PET asupra comportamentului fizico-mecanic al mixturilor asfaltice. Printre caracteristicile analizate s-au numărat: stabilitatea Marshall, densitatea aparentă, fluajul static, absorbția de apă, gradul de umflare în timp, precum și comportamentul la solicitări dinamice. Rezultatele obținute au evidențiat, în mod constant, că adaosul de fibre de PET contribuie la îmbunătățirea semnificativă a stabilității și rigidității mixturilor, fără a afecta negativ proprietățile esențiale, precum capacitatea de compactare sau rezistența la acțiunea apei.

În plus față de testările standard, au fost efectuate încercări specifice de rezistență la oboseală și fluaj dinamic, în conformitate cu prevederile normativului AND 605/2016, pentru a evalua comportamentul mixturilor asfaltice modificate cu fibre de PET în condiții de solicitări ciclice. Rezultatele obținute au demonstrat că aceste mixturi prezintă o rezistență sporită la deformațiile permanente și o durată de viață semnificativ extinsă în raport cu variantele martor, atunci când sunt supuse ciclurilor repetate de încărcare. Aceste constatări validează ipoteza conform căreia fibrele de PET funcționează ca un sistem de armare internă în cadrul matricii asfaltice, analog cu rolul pe care îl îndeplinesc fibrele metalice sau sintetice în compoziția betoanelor performante. Prin distribuirea și disiparea tensiunilor concentrate, fibrele contribuie la întârzierea procesului de formare a fisurilor și la limitarea propagării acestora, ceea ce conduce implicit la o creștere a durabilității în exploatare a structurii rutiere (Jia și colab., 2023).

Dincolo de performanțele tehnice, această cercetare integrează și o analiză complexă a implicațiilor ecologice și economice asociate utilizării fibrelor de PET reciclat în infrastructura rutieră. Estimările realizate indică faptul că înlocuirea parțială a bitumului sau a agregatelor minerale cu material PET poate genera beneficii substanțiale, printre care se numără reducerea emisiilor de dioxid de carbon (CO_2), scăderea costurilor aferente lucrărilor de întreținere și reparație, precum și prelungirea duratei de exploatare a structurilor rutiere. În același timp, prin valorificarea deșeurilor plastice și limitarea cantității care ajunge în depozite de gunoi sau este

abandonată în mediu, această abordare contribuie în mod direct la atingerea obiectivelor strategice stabilite de Uniunea Europeană în materie de gestionare a deșeurilor. Unul dintre aceste obiective vizează reducerea cu 50% a volumului de plastic nereciclat până în anul 2030 – un prag care ar putea deveni mai accesibil prin implementarea unor soluții inovatoare precum integrarea PET-ului reciclat în domeniul construcțiilor rutiere (European Parliament, 2018).

În ceea ce privește compoziția mixturilor asfaltice investigate în cadrul prezentei cercetări, autorul a respectat cu rigurozitate prevederile legislației tehnice românești în vigoare, cu precădere dispozițiile cuprinse în normativul AND 605/2016, care reglementează proiectarea, prepararea și punerea în operă a mixturilor asfaltice. Acest normativ stabilește cerințe minime obligatorii referitoare la natura și granulozitatea agregatelor, proporția de bitum utilizată, gradul de compactabilitate, precum și la performanțele mecanice ale mixturii finale. Pentru a evalua influența tipului de rocă asupra comportamentului mixturilor modificate cu fibre de PET, au fost utilizate două tipuri distincte de agregate: agregate concasate provenite din carieră și agregate naturale din balastieră. În ceea ce privește conținutul de liant bituminos, acesta a fost determinat pentru fiecare tip de rețetă prin intermediul unor încercări preliminare, care au avut drept scop identificarea proporției optime ce asigură un echilibru corespunzător între stabilitate mecanică și flexibilitate structurală. Această abordare a permis obținerea unor mixturi conforme cu standardele de calitate impuse, optimizate în funcție de materialele utilizate și de scopul experimental al studiului.

Un element de originalitate al cercetării constă în abordarea fibrelor de PET nu doar ca aditivi secundari, ci ca microarmături interne cu rol funcțional clar definit în cadrul mixturii asfaltice. Spre deosebire de alte studii care utilizează particule plastice sub formă de fulgi sau granule, prezenta lucrare propune utilizarea fibrelor ca elemente de armare distribuite uniform în matricea compozitului. Fibrele au fost obținute prin tăierea mecanică a recipientelor PET post-consum, rezultând fâșii cu dimensiuni uniforme: o lungime medie de aproximativ 15 mm și o lățime de circa 1 mm. Această geometrie a fost selectată strategic, pentru a asigura o lungime suficientă care să permită redistribuirea tensiunilor în amestec, dar în același timp o dimensiune redusă care să faciliteze dispersia uniformă în masa de agregate, fără a compromite omogenitatea compoziției. Procesul de încorporare a fibrelor a respectat principiile metodei uscate, în cadrul căreia fibrele au fost adăugate direct în agregatele minerale înainte de introducerea liantului bituminos. Ulterior, mixtura obținută a fost supusă unui set de încercări standardizate, desfășurate în cadrul laboratorului specializat al facultății, pentru a evalua influența fibrelor asupra comportamentului mecanic și durabilității în timp a materialului rutier rezultat.

Printre testele esențiale efectuate asupra mixturilor asfaltice modificate cu fibre de PET s-au numărat determinările privind densitatea aparentă, porozitatea și gradul de compactare – parametri relevanți pentru aprecierea calității și a comportamentului tehnologic al amestecului. Rezultatele experimentale au arătat că introducerea fibrelor de PET nu are un impact negativ asupra capacității de compactare a mixturilor. Dimpotrivă, valorile densității s-au menținut în limitele prescrise de normele tehnice, înregistrând variații minore, de ordinul a 1–2%, față de probele martor fără adaos de fibre. De asemenea, gradul de compactare obținut în condiții de laborator a fost situat între 98% și 99,5%, ceea ce reflectă o comportare foarte bună din punct de vedere tehnologic. Aceste rezultate confirmă faptul că adaosul de fibre de PET nu afectează negativ procesul de formare a structurii compacte a mixturii, fiind compatibil cu tehnologia standard de producere și punere în operă a asfaltului.

Stabilitatea Marshall a constituit un parametru esențial în evaluarea efectelor introducerii fibrelor de PET asupra performanței mecanice a mixturilor asfaltice. Rezultatele obținute în cadrul testărilor au evidențiat o creștere semnificativă a valorilor stabilității, cuprinsă între 15% și 20% față de mixturile martor, mai ales în cazul compozițiilor realizate cu agregate concasate din carieră. Această îmbunătățire poate fi explicată prin interacțiunea eficientă dintre fibrele de PET și scheletul granular al amestecului, interacțiune ce conduce la o mai bună distribuire a eforturilor interne și la o rezistență sporită în fața solicitărilor verticale. În paralel, determinările privind fluajul static au arătat valori sensibil mai scăzute în cazul mixturilor modificate cu PET, comparativ cu cele nemodificate. Această tendință indică o capacitate mai mare de rezistență la deformările plastice permanente atunci când materialul este supus unor sarcini constante, ceea ce sugerează un comportament îmbunătățit în condiții reale de trafic, în special pe drumuri expuse la încărcări repetate și de durată.

Un aspect important analizat în cadrul acestei cercetări a fost comportamentul mixturilor asfaltice în condiții de mediu variabil, cu accent pe influența umidității asupra capacității de absorbție a apei și a fenomenului de umflare în timp. Fibrele de PET, datorită naturii lor hidrofobe, nu favorizează în mod direct absorbția apei. Cu toate acestea, integrarea acestora în structura mixturii poate modifica ușor configurarea internă a porozității, afectând astfel capacitatea globală de retenție a apei. Testele de absorbție, desfășurate pe o perioadă de 28 de zile, au evidențiat o creștere ușoară a absorbției în cazul mixturilor care conțin fibre de PET, cu valori cuprinse în general în limitele a 5% peste cele obținute pentru probele martor. Această variație, deși măsurabilă, nu a avut un impact semnificativ asupra comportamentului mecanic general al materialului. În ceea ce privește umflarea volumetrică, valorile înregistrate s-au situat în limitele acceptate de reglementările tehnice, indicând o bună stabilitate dimensională a

mixturilor modificate, inclusiv în condiții de expunere prelungită la umiditate și la variații de temperatură.

Pentru o caracterizare completă a comportamentului mixturilor asfaltice modificate, cercetarea a inclus, pe lângă testele statice, și o serie de încercări dinamice menite să simuleze condițiile reale de solicitare întâlnite în trafic. Aceste teste au vizat determinarea rezistenței la fluaj dinamic, rezistenței la oboseală și rigidității, utilizând echipamente de laborator specializate și metode standardizate, conforme cu cerințele tehnice în vigoare. Rezultatele au evidențiat o îmbunătățire semnificativă a comportamentului mixturilor modificate cu PET, în special în ceea ce privește rezistența la fluaj dinamic. În acest sens, s-a observat o reducere de până la 25% a deformărilor permanente în comparație cu mixturile martor. Acest aspect susține ipoteza conform căreia fibrele de PET acționează ca un mecanism de armare internă, reducând mobilitatea relativă a agregatelor și contribuind la disiparea eficientă a tensiunilor în masa mixturii. Prin această acțiune, fibrele întăresc structura internă a asfaltului, limitând acumularea deformărilor plastice în condiții de solicitare ciclică.

În ceea ce privește rezistența la oboseală, testele realizate au evidențiat o performanță superioară a mixturilor asfaltice armate cu fibre de PET, comparativ cu variantele martor. Aceste mixturi au rezistat unui număr semnificativ mai mare de cicluri de solicitare înainte de apariția fisurilor vizibile, demonstrând o capacitate crescută de adaptare la solicitările repetate. Această proprietate este esențială în contextul traficului rutier intens, în care fisurarea reprezintă adesea punctul de inițiere al proceselor de degradare accelerată a stratului de rulare. Performanța mixturilor modificate a fost deosebit de notabilă în cazul stratului de uzură, unde solicitările mecanice sunt cele mai ridicate, iar rezistența la oboseală devine un criteriu critic pentru asigurarea durabilității structurii rutiere. De asemenea, s-a constatat că rigiditatea mixturilor a fost mai mare în cazul celor modificate cu PET, ceea ce indică o capacitate superioară de preluare a sarcinilor verticale. Această creștere a rigidității nu a compromis flexibilitatea globală a materialului, care s-a menținut în limitele necesare pentru a face față variațiilor climatice, inclusiv ciclurilor de îngheț-dezghet sau dilatațiilor termice.

O contribuție semnificativă a prezentei lucrări constă în abordarea integrativă a rezultatelor obținute, care nu se limitează la performanțele fizico-mecanice ale mixturilor asfaltice modificate cu PET, ci include și o evaluare a implicațiilor tehnologice, economice și ecologice ale acestei soluții. Analiza multidimensională subliniază faptul că implementarea tehnologiei propuse nu presupune investiții substanțiale în echipamente noi sau în restructurarea procesului de producție. Dimpotrivă, integrarea fibrelor de PET în rețetele de asfalt poate fi realizată în cadrul instalațiilor existente, cu ajustări minime ale fluxului tehnologic. Din punct

de vedere economic, costurile asociate cu prepararea fibrelor de PET sunt reduse, mai ales în situațiile în care materialul este obținut din surse locale, prin colectarea și prelucrarea deșeurilor plastice de tip menajer. Această abordare nu doar că eficientizează procesul de gestionare a deșeurilor, dar contribuie și la crearea unei economii circulare funcționale, în care resursele sunt valorificate sustenabil în domenii de interes strategic, cum este infrastructura rutieră.

Pe lângă avantajele tehnologice și de mediu, introducerea fibrelor de PET în infrastructura rutieră poate genera beneficii economice substanțiale pe termen mediu și lung. Prin sporirea durabilității structurii rutiere și reducerea frecvenței intervențiilor de reparație și reabilitare, această soluție contribuie la optimizarea costurilor de întreținere suportate de autoritățile locale și centrale. Astfel, se pot obține economii semnificative la nivelul bugetelor destinate administrării și conservării rețelei de drumuri. Totodată, utilizarea PET-ului reciclat în compoziția mixturilor asfaltice contribuie la diminuarea presiunii exercitate asupra sistemului de gestionare a deșeurilor. Prin redirectionarea unei părți a deșeurilor plastice din fluxurile menajere către sectorul construcțiilor, se sprijină atingerea obiectivelor naționale și europene privind creșterea gradului de reciclare, reducerea volumului de deșeuri nereciclate și promovarea unui model de dezvoltare sustenabilă, în acord cu principiile economiei circulare.

La nivel european și internațional, există deja numeroase exemple de bune practici privind utilizarea materialelor plastice reciclate, inclusiv a fibrelor de PET, în compoziția mixturilor asfaltice. Țări precum Olanda, India, Regatul Unit și Australia au implementat atât proiecte-pilot, cât și secțiuni extinse de drum în care au fost utilizate astfel de soluții inovatoare. Studiile de monitorizare desfășurate în aceste regiuni au evidențiat performanțe tehnice remarcabile, concretizate printr-o rezistență superioară la uzură, o stabilitate crescută în timp și o reducere semnificativă a costurilor de întreținere a infrastructurii rutiere (Van Dijk și colab., 2022; Ranganathan și colab., 2021). Deși în România această practică se află într-un stadiu incipient, potențialul de implementare este considerabil, în special în contextul proiectelor de reabilitare și modernizare a rețelei rutiere. Disponibilitatea fondurilor europene nerambursabile, inclusiv prin intermediul Planului Național de Redresare și Reziliență (PNRR), oferă cadrul financiar necesar pentru testarea și aplicarea acestor tehnologii inovatoare. Integrarea mixturilor asfaltice modificate cu PET în strategia națională de infrastructură ar putea contribui la alinierea României la standardele europene de sustenabilitate și eficiență economică în sectorul construcțiilor rutiere.

Pe termen lung, se propune integrarea utilizării fibrelor de PET reciclat în standardele naționale de proiectare, preparare și execuție a lucrărilor rutiere, ca parte a unei strategii mai ample de modernizare și sustenabilizare a infrastructurii de transport. Pentru atingerea acestui

obiectiv, este necesară dezvoltarea unui cadru coerent de cercetare aplicativă, care să includă proiecte demonstrative și programe-pilot desfășurate în condiții reale de exploatare. Implementarea la scară largă a acestei tehnologii presupune, de asemenea, o colaborare strânsă între mediul academic, instituțiile publice cu responsabilități în domeniul infrastructurii și operatorii economici din sectorul construcțiilor. Elaborarea unor norme tehnice dedicate, ghiduri de bună practică și proceduri standardizate de aplicare este esențială pentru asigurarea unui cadru predictibil și sigur. Un aspect important în acest sens îl reprezintă reglementarea clară a dozajului maxim admis de fibre de PET în compoziția mixturilor asfaltice, în funcție de tipul de strat rutier și condițiile de exploatare, pentru a garanta performanța și durabilitatea pe termen lung a soluției propuse.