



UNIVERSITATEA TEHNICĂ “GHEORGHE ASACHI” IAȘI

FACULTATEA DE MECANICĂ

DOMENIUL: *INGINERIA MATERIALELOR*



CERCETĂRI ASUPRA STICLEI RECICLATE ȘI CONCASATE ÎN DIVERSE APLICAȚII

Coordonator științific:

Prof.univ.dr.ing. Munteanu Corneliu

Doctorand:

Drd. Epure Cristian

INTRODUCERE

În acest proiect mi-am propus ca plan de cercetare producerea unor materiale inovative obținute din sticlă reciclată, concasată și supusă unui proces de tratament termic etapizat, având ca obiectiv principal valorificarea deșeurilor de sticlă și transformarea acestora într-un produs competitiv și durabil. Un alt scop urmărit este diminuarea semnificativă a costurilor de producție și, implicit, a prețului de utilizare în comparație cu materialele consacrate pe plan mondial, precum sticla de Murano sau mozaicul DSM China, recunoscute pentru tradiția și calitatea lor, dar și pentru costurile ridicate. Prin aplicarea unor metode de tratare controlată se dorește obținerea unor proprietăți mecanice și chimice superioare, care să permită integrarea acestor materiale reciclate în domenii variate, de la construcții și design interior până la aplicații artistice. Astfel, cercetarea se axează atât pe avantajele economice și ecologice, prin reducerea deșeurilor și promovarea principiilor economiei circulare, cât și pe relevanța tehnologică, vizând dezvoltarea unor alternative viabile la produsele tradiționale cu impact major pe piața internațională.

Sticla reciclată și concasată este un material rezultat printr-un proces tehnologic care transformă deșeurile de sticlă în agregate utilizabile în diverse aplicații industriale și comerciale procesul începe cu colectarea deșeurilor de sticlă care sunt sortate în funcție de culoare pentru a evita contaminarea apoi sunt curățate de impurități precum etichete capace și alte materiale străine după care sunt concasate în particule de diferite dimensiuni de la praf de sticlă cu granulație sub 1 milimetru până la agregate grosiere de peste 10 milimetri acest material obținut este cunoscut sub denumirea de sticlă concasată sau agregat de sticlă și este utilizat în multiple domenii datorită proprietăților sale precum duritatea ridicată de aproximativ 6 până la 7 pe scara Mohs densitatea medie de 2.5 grame pe centimetru cub inerție chimică și rezistență la intemperii.

În domeniul construcțiilor sticla concasată este utilizată ca înlocuitor parțial pentru agregatele tradiționale în beton asfalt și mortare unde contribuie la reducerea greutății structurale și la îmbunătățirea performanței termoizolante în betoanele decorative adăugarea de sticlă reciclată colorată permite obținerea unor suprafețe estetice folosite la pavarea aleilor trotuarelor și placărilor interioare și exterioare în infrastructura rutieră este utilizată în amestecuri asfaltice unde îmbunătățește rezistența la uzură și oferă o mai bună aderență reducând în același timp necesarul de bitum cu pana la 10 la sută în lucrările de terasamente și umpluturi este folosită pentru stabilizarea solului și creșterea capacității portante fiind o alternativă eficientă la agregatele naturale. În domeniul peisagistic sticla concasată este folosită în amenajarea grădinilor spațiilor verzi și fațadelor vegetale datorită aspectului decorativ și a durabilității în timp în industria sticlei cioburile reciclate sunt introduse în cuptoarele de topire unde contribuie la reducerea temperaturii de fuziune cu pana la 25 la sută ceea ce se traduce printr-o scădere de aproximativ 30 la sută a consumului energetic și o reducere semnificativa a emisiilor de dioxid de carbon în sectorul izolațiilor sticla reciclată este materia primă principală pentru producerea vatei de sticlă care are un coeficient de conductivitate termică între 0.035 și 0.045 W pe metru Kelvin și este utilizată în izolarea termică și fonică a clădirilor contribuind la eficiența energetică.

În domeniul industrial sticla concasată este folosită ca mediu filtrant în instalații de tratare a apei potabile și a apelor uzate datorită suprafeței mari de contact și a rezistenței chimice fiind mai durabilă și mai eficientă decât nisipul silicios tradițional este de asemenea utilizată în producția de materiale abrazive în sablare și în aplicații pentru turnatorii și materiale compozite impactul ecologic al utilizării sticlei reciclate este considerabil reducând-se consumul de materii

prime neregenerabile precum nisipul calcarul și carbonatul de sodiu diminuând-se volumul de deșeuri trimise la gropile de gunoi și limitând emisiile de gaze cu efect de seră datele arată ca pentru fiecare tona de sticlă reciclată se economisesc aproximativ 315 kilograme de dioxid de carbon și peste 1.2 tone de materii prime impactul economic este de asemenea pozitiv reducerea costurilor energetice în fabricile de sticlă optimizarea costurilor în construcții și crearea de locuri de muncă în activitățile de colectare procesare și valorificare a deșeurilor contribuie la dezvoltarea unei economii circulare durabile și eficiente utilizarea sticlei reciclate și concasate devine astfel o soluție strategică cu beneficii tehnice economice și de mediu integrate în contextul dezvoltării durabile.

CAPITOLUL I

STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR ASUPRA STICLEI RECICLATE ȘI CONCASATE ÎN DIVERSE CU APLICAREA ÎN DOMENII

1.1.Noțiuni generale despre sticla reciclată și concasată

Primele urme arheologice ale sticlei datează din jurul mileniului al III-lea î.Hr., în Mesopotamia și Egipt. Descoperirile constau în mărgel vitrate și obiecte ornamentale, probabil obținute accidental, ca produs secundar al proceselor metalurgice și ceramice. Inițial, sticla nu era fabricată intenționat în formă masivă, ci sub formă de glazuri colorate care imitau pietrele prețioase, precum lapislazuli sau turcoazul. În jurul anului 1500 î.Hr., în Egipt, apar primele vase din sticlă opacă, realizate prin tehnica modelării pe miez (core-forming). Acestea erau destinate elitelor și aveau rol mai degrabă decorativ decât utilitar. Un moment decisiv în istoria sticlei a fost inventarea tehnicii de suflare a sticlei, în jurul secolului I î.Hr., de către meșteșugarii fenicieni. Această metodă, bazată pe utilizarea unei țevi de suflat, a permis obținerea de recipiente subțiri, transparente și diversificate ca formă.

Romanii au preluat și perfecționat această tehnologie, transformând sticla într-un material comun pentru uzul cotidian. În perioada imperială, centre de producție precum Alexandria și Roma au devenit noduri majore de inovare. Tot în această epocă, sticla a început să fie utilizată și în arhitectură, sub formă de ferestre simple în vile și băi publice. După căderea Imperiului Roman, producția de sticlă a cunoscut o scădere în Europa Occidentală, fiind menținută în Bizanț și în Orientul Mijlociu. Începând cu secolele IX–X, centrele europene de producție au început să se dezvolte din nou, mai ales în Germania, Franța și Italia.

Un aspect definitoriu al Evului Mediu a fost sticla colorată utilizată în vitralii. Catedralele gotice, precum cele din Chartres sau Notre-Dame, au transformat vitraliile în expresii artistice și spirituale de mare complexitate. În aceeași perioadă, Veneția a devenit un pol al inovației tehnologice. Pe insula Murano, meșteșugarii au perfecționat rețetele și tehnicile de prelucrare, dezvoltând sticla cristalină, emailată, filigranată sau oglindită. Secreta „cristallo”, o sticlă aproape incoloră și foarte transparentă, a devenit un reper de excelență artistică și tehnică. În secolele XVII–XVIII, inovațiile tehnologice au schimbat radical industria sticlei. În Anglia, George Ravenscroft a introdus sticla cu plumb (cristalul de plumb), apreciată pentru strălucirea și refracția sa, folosită pe scară largă la obiecte decorative și pahare de lux. Odată cu revoluția industrială, producția de sticlă a devenit mecanizată. În secolul XIX, a fost dezvoltată sticla plană laminată, utilizată în construcții și arhitectură. La sfârșitul secolului XIX și începutul secolului XX, invenția procesului de tragere a cilindrilor și a plăcilor de sticlă a facilitat utilizarea ferestrelor mari și accesibile.

Secolul XX a marcat trecerea de la utilizările tradiționale la aplicații de înaltă tehnologie. În anii 1950, a fost inventat procesul float-glass, dezvoltat de compania Pilkington, care a permis producerea de sticlă plană perfect uniformă și transparentă, devenind standardul mondial.

Istoria sticlei reflectă o evoluție complexă și multidimensională, de la obiect decorativ elitist la material strategic indispensabil societății moderne. Dacă în Antichitate sticla era un simbol al prestigiului, iar în Evul Mediu un suport artistic și religios, epoca industrială și

contemporană au transformat-o într-un pilon al progresului științific și tehnologic. Astăzi, sticla nu mai este privită doar ca un material de uz cotidian, ci ca un element fundamental în inovația tehnologică și în dezvoltarea durabilă, confirmând continuitatea și adaptabilitatea sa de-a lungul a peste patru milenii de istorie.[1,2].

1.1.2.Sursa materiilor prime

Deșeurile devin o problemă din ce în ce mai gravă la nivel mondial, atât din punct de vedere ecologic, cât și economic [3]. Practica depozitării deșeurilor în gropi de gunoi a devenit o problemă ecologică serioasă [4] din cauza cantităților mari de deșeuri produse anual. Depozitele de deșeuri sunt considerate resurse limitate. În plus, construcția de drumuri și alte activități legate de transport sunt responsabile pentru utilizarea unor cantități semnificative de resurse naturale. Incorporarea materialelor reciclate în proiectele de construcții, cum ar fi betonul, asfaltul, plăcile ceramice, izolația termică, pavajele ecologice etc., este o tehnică de reducere a efectelor negative asupra mediului. Materialele de pavaj utilizate în mod obișnuit includ nisip, pietriș, piatră concasată, asfalt și beton, pe lângă alte materiale de construcție naturale. În 2018, emisiile globale de CO₂ legate de consumul final de energie au reprezentat 36% din totalul mondial [5]. Industria construcțiilor a fost responsabilă pentru 36% din emisiile de gaze cu efect de seră. Pentru a menține un mediu sănătos și durabil, a existat o mare nevoie de a cerceta materiale alternative durabile care să aibă performanțe comparabile cu agregatele tipice pentru construcții [6].

Sticla este un component al multor tipuri diferite de produse pe care majoritatea oamenilor le utilizează în mod regulat și cu care s-au obișnuit. Ea poate lua forma unei oglinzi, a unei sticle, a ecranului unui dispozitiv mobil, a ecranului unui computer, a ferestrelor sau ușilor unei case sau ale unui automobil, sau a unei mese. În consecință, populația mondială continuă să consume cantități semnificative de sticlă, o parte din aceasta ajungând în final la deșeuri și contribuind la generarea a aproximativ 130 de milioane de tone de deșeuri de sticlă în fiecare an [7]. În plus, rapoartele indică faptul că ratele de reciclare sunt destul de scăzute. Doar 13% din sticla produsă în China continentală și 28% din sticla produsă în Statele Unite sunt reciclate, rezultând aproximativ 40 și, respectiv, 11,54 milioane de tone de deșeuri de sticlă produse în fiecare an. În perioada 2018-2019, Australia a utilizat peste 1,21 milioane de tone de sticlă anual, aproximativ 90% din această cantitate fiind destinată ambalajelor din sticlă. În aceeași perioadă, s-a estimat că cantitatea de deșeuri de sticlă generate în Australia a fost de 1,16 milioane de tone, cu o rată de reciclare de 60% [8]. Datorită cantităților uriașe generate, ratelor scăzute de reciclare și naturii ne-biodegradabile a sticlei, o cantitate mare de deșeuri de sticlă s-a acumulat în depozitele de deșeuri, ceea ce reprezintă un pericol pentru flora și fauna naturală. Cantitatea de deșeuri de sticlă produsă în diferite țări este prezentată în tabelul I.1, împreună cu procente de reciclare și eliminare realizate în figura I.1.

În România, în evoluția ambalajelor introduse pe piață și recuperate în perioada 2009-2022, statistic, din aproximativ 2,4 milioane de tone de ambalaje introduse pe piață în 2022 (POM - Put On Market), 1,5 milioane de tone de ambalaje (61%) au fost reciclate și 4% au fost recuperate prin alte metode (VAM). Această informație provine de la Asociația Română a Industriei Ambalajelor. În cursul anului 2022, au fost introduse pe piață 463.400 de tone de ambalaje din sticlă. Din acest total, 65% au fost reciclate. Este posibil ca până în anul 2022, România să-și fi atins obiectivele anterioare (din 2008) de reciclare a sticlei de 60%, iar țara se apropie foarte mult de atingerea obiectivelor pentru anul 2025, care sunt de 70% pentru sticlă, Figura I.2 [11].

Tabelul I.1. Procentul de sticlă reciclată în diferite țări [7–10].

Nr.	Țara	RCG
01.	Belgia	96%
02.	Elveția	94%
03.	Luxemburg	93%
04.	Olanda	91%
05.	Norvegia	89%
06.	Germania	82%
07.	Italia	74%
08.	Franța	67%
09.	Anglia	61%
10.	Spania	57%
11.	USA	33%

S-a stabilit că industria construcțiilor civile și a construcțiilor este unul dintre domeniile care pot reduce considerabil acumularea problematică a deșeurilor de sticlă la depozitele de deșeuri. Acest lucru are un efect pozitiv asupra reducerii cantității de sticlă care ajunge la depozitele de deșeuri și îmbunătățirii mediului natural prin minimizarea utilizării materiilor prime extrase în proiectele de inginerie [10]. Industria include proiecte care pot utiliza volume considerabile de sticlă. Agregatele de sticlă pot fi găsite într-o varietate de forme, cum ar fi sticla zdrobită, sticla reciclată, deșeurile de sticlă, sticla reciclată fină, sticla reciclată medie, sticla reciclată grosieră, pulberea de sticlă, sticla spumată și geopolimerii de sticlă. Aceste tipuri de agregate de sticlă au fost utilizate în studiile de cercetare și testele de teren. Sticla spartă, domeniile care pot reduce considerabil acumularea problematică a deșeurilor de sticlă la depozitele de deșeuri. Acest lucru are un efect pozitiv asupra reducerii cantității de sticlă care ajunge la depozitele de deșeuri și îmbunătățirii mediului natural prin minimizarea utilizării materiilor prime extrase în proiectele de inginerie [10]. Industria include proiecte care pot utiliza volume considerabile de sticlă. Agregatele de sticlă pot fi găsite într-o varietate de forme, cum ar fi sticla zdrobită, sticla reciclată, deșeurile de sticlă, sticla reciclată fină, sticla reciclată medie, sticla reciclată grosieră, pulberea de sticlă, sticla spumată și geopolimerii de sticlă. Aceste tipuri de agregate de sticlă au fost utilizate în studiile de cercetare și testele de teren.



Figura I.1. Sticlă reciclată și zdrobită (RCG).

Sticla spartă, cunoscută și sub denumirea de sticlă reciclată zdrobită, este alcătuită din deșeuri de sticlă care au fost acumulate în instalații de reciclare și care au fost zdrobite mecanic până la o dimensiune maximă a particulelor de 4,75, 9,50 sau 19,00 mm, respectiv. Pe de altă parte, pulberea de sticlă este alcătuită din sticlă care a fost zdrobită mecanic până la o consistență uniformă, cu o dimensiune specifică în funcție de scopul pentru care este utilizată. Amestecarea pulberii de sticlă cu o soluție alcalină este tipică pentru producerea geopolimerilor pe bază de sticlă. Cu această metodă, mediul bogat în siliciu din pulberea de sticlă ajută la stimularea procesului de geopolimerizare.

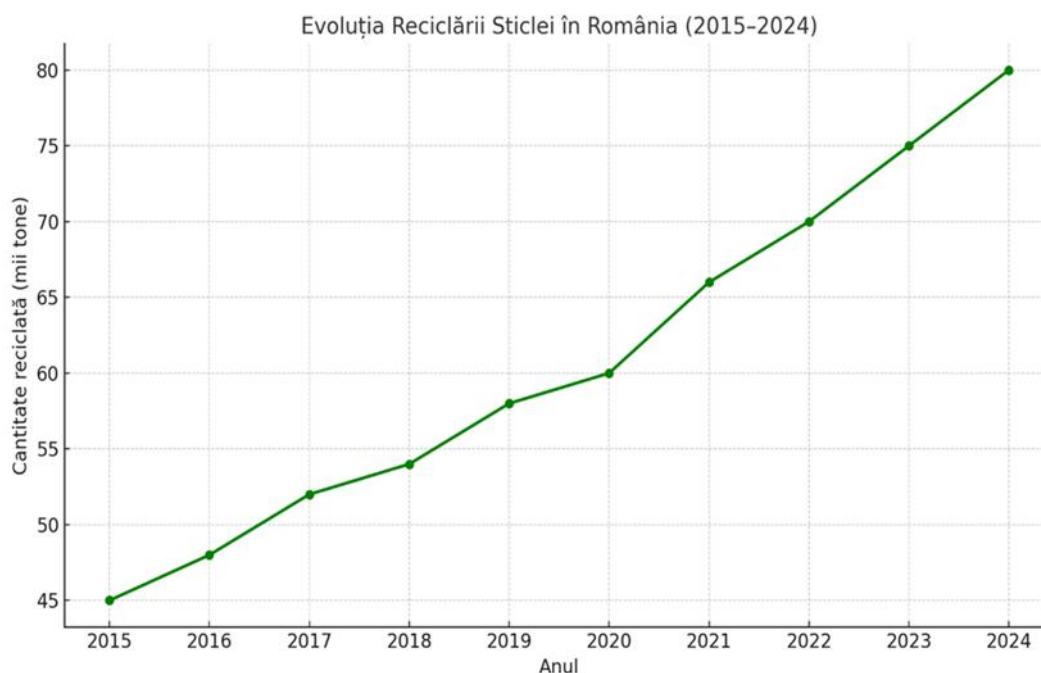


Figura I.2. Evoluția reciclării sticlei (kg) [11].

De asemenea, este îndoielnic faptul că înlocuirea a până la 10% din agregatele naturale cu sticlă reziduală va avea un impact negativ semnificativ asupra performanței generale a amestecurilor [12]. Acest lucru se datorează faptului că agregatele naturale sunt mult mai dense decât sticla uzată. SRC este o opțiune excelentă pentru utilizarea ca material suplimentar în diverse aplicații, deoarece are un impact redus asupra mediului înconjurător [13]. S-a raportat că amestecurile SRC tratate cu ciment ar putea beneficia de adăugarea a până la cincisprezece procente de sticlă reciclată zdrobită [14]. Datorită naturii sale hidrofobe, sticla uzată rareori suferă modificări semnificative ale densității sale maxime uscate ca răspuns la schimbările umidității relative. Conform multor studii, este posibil să se integreze până la 30% sticlă uzată în produse, respectând în același timp toate standardele [15].

S-a descoperit că sticla fină reciclată avea rezistența adecvată pentru straturile de fundație ale pavajelor și o prelucrabilitate excelentă atunci când era adăugată la agregatul de rocă reziduală într-un procent optim de 15% din masa uscată [16]. Atunci când era adăugată la betonul reciclat concasat în același procent, amestecul se dovedea promițător pentru utilizarea în straturile de bază ale pavajelor [17].

Eficiența unui geopolimer pe bază de pulbere de sticlă reciclată (RGP) în tratarea solurilor argiloase a făcut obiectul cercetărilor [18]. S-a demonstrat că raportul molar al soluției alcaline,

temperatura de început a sintezei și timpul de polimerizare joacă toate un rol important în caracteristicile geopolimerului RGP și în eficacitatea acestuia în stabilizarea solurilor argiloase. RGP este un ingredient excelent pentru reacția alcalin-siliciu (ASR) în cimentul geopolimer bazat pe RGP [19], deoarece are o concentrație ridicată de siliciu și este, prin urmare, o sursă bogată de acest element, Figura I.3.

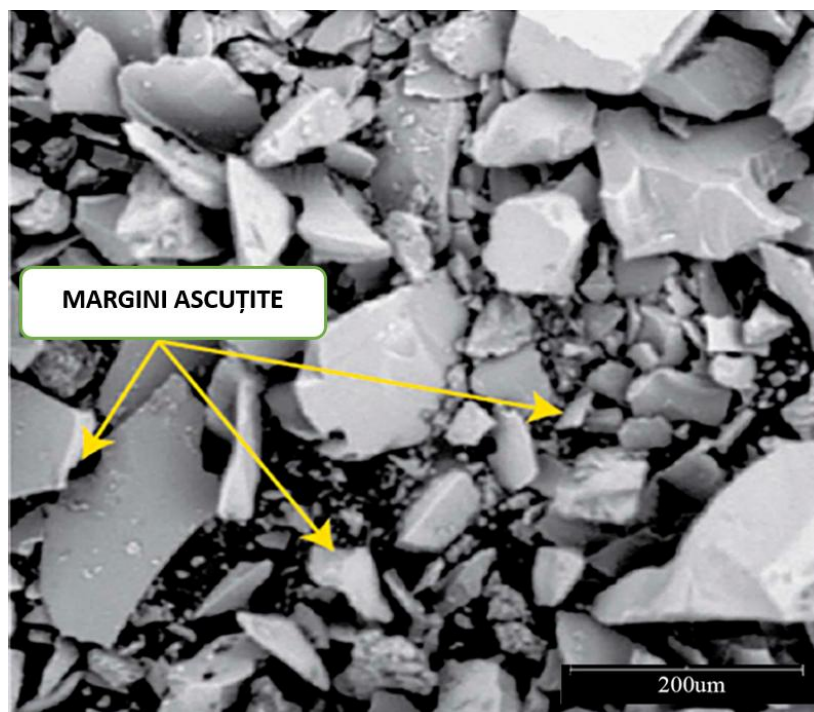


Figura I.3. Micrografii SEM ale pulberii de sticlă reciclată (200 μm) [20].

În calitate de cercetători care activează în lumea modernă, este esențial ca toate cercetările efectuate să fie în concordanță cu conceptul de durabilitate. Voința noastră face posibilă protejarea resurselor naturale valoroase și în scădere, pentru a putea fi utilizate de către oamenii care trăiesc pe planeta noastră în viitorul previzibil. O strategie de acest fel nu numai că ajută la protejarea acestor resurse, dar are și efecte pozitive asupra mediului, sub forma reducerii emisiilor de gaze cu efect de seră, ceea ce, la rândul său, conduce la o serie de efecte pozitive asupra mediului.

CAPITOLUL II

PROIECTAREA ȘI OBȚINEREA STICLII RECICLATE ȘI CONCASATE TRATATE TERMIC

2.1. Noțiuni generale

Mai multe studii au arătat că deșeurile de sticlă au potențialul de a fi utilizate într-o mare varietate de aplicații în domeniul ingineriei civile. Unele dintre aceste aplicații includ producția de beton, materiale geotehnice, geopolimeri și alte produse pe bază de sticlă. În special în domeniul ingineriei civile, aplicațiile potențiale ale deșeurilor de sticlă depășesc funcția sa, deoarece prezintă proprietăți comparabile cu cele ale agregatelor naturale. "Sticla de siliciu" este cel mai cunoscut tip de sticlă și este, de asemenea, cel mai vechi. Este fabricată din dioxid de siliciu, care este componenta principală a nisipului. [10]. Termenul "sticlă de siliciu" se referă la un tip de sticlă care este atât cel mai cunoscut, cât și cel mai vechi. Este formulat din dioxid de siliciu, care este componenta majoră a nisipului. Este fabricat din aproximativ 75% dioxid de siliciu (SiO_2), oxid de sodiu (Na_2O) obținut prin descompunerea carbonatului de sodiu (Na_2CO_3), oxid de calciu (CaO), precum și din alți câțiva aditivi minori. Materialele cristaline cunoscute sub numele de vitro-ceramică sunt produse atunci când tratamentul termic determină cristalizarea sticlei într-un mod controlat, ceea ce duce la formarea materialului. Ceramica de sticlă oferă o gamă variată de utilizări în numeroase industrii diferite datorită calităților fizice și chimice pe care le posedă. Este bine cunoscut faptul că calitățile vitro-ceramicii sunt determinate în primul rând de numărul de faze cristaline și de faza de sticlă reziduală, în plus față de tipurile de cristale și de dimensiunea granulelor de cristal [11,15]. Prin urmare, este posibil să se genereze vitro-ceramică cu calități specifice prin modificarea compozițiilor sticlei de bază și prin alegerea unei proceduri adecvate pentru tratamentul termic. Utilizând sticlă reciclată și concasată (SRC) provenită din deșeuri menajere, la care s-au adăugat pigmenți ceramici (CK11020, CK33100) și oxizi (TiO_2), a fost posibil să se observe efectele procedurii de tratament termic asupra cristalizării și a coeficientului de dilatare termică.

2.2. Elaborarea sticlei reciclate și concasate tratate termic (SRCT)

Procesul de producție va urmări următoarele etape:

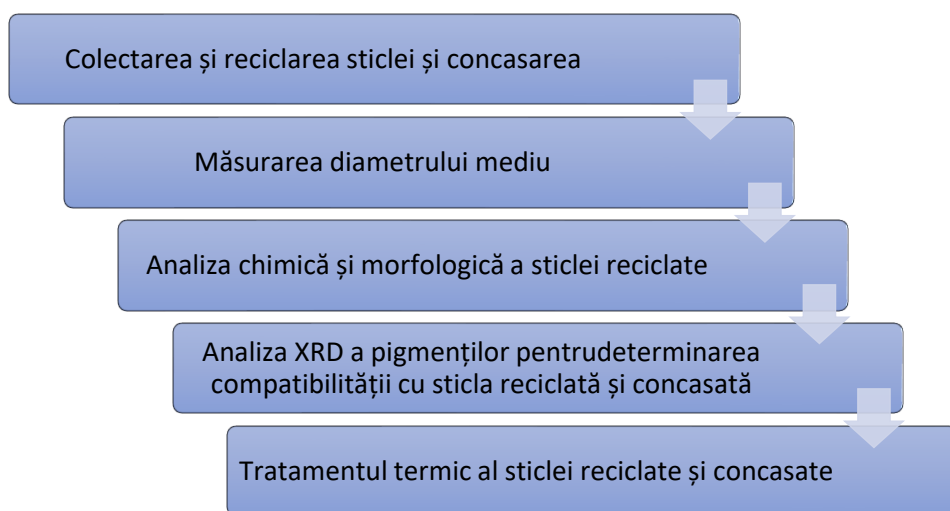


Figura II. Etapele producerii sticlei reciclate concasate și tratate termic

Caracterul complex al determinărilor experimentale rezultă din planificarea experimentală a cercetărilor care este prezentată în tabelul următor.

Tabelul II. Planificarea experimentală a cercetărilor

Obiectiv	Metodă
Caracterizarea structurală	Microscopie optică Difracția de raze X (XRD)
Compoziția chimică	Dispersie de energie (EDS)
Morfologia suprafeței	Microscopie electronică (SEM)
Caracteristici mecanice	Metoda “micro-scratch” Compresiune Determinarea micro-durității prin metoda Vickers
Determinării rezistenței la șoc termic	Cuptorul Solar din Odeillo, situat în Pirineii, Franța
Rezistența chimică	Soluții de HCl (acid clorhidric) și KOH (hidroxid de potasiu).

2.2.1. Prelucrarea sticlei reciclate și concasate

Pentru acest studiu se va utiliza sticlă menajeră reciclată, menționând că reciclarea sticlei menajere este un proces important pentru protejarea mediului și conservarea resurselor naturale. În timpul procesului de reciclare au fost respectate normele europene privind reciclarea deșeurilor menajere [16]. Pentru a obține sticla reciclată și mărunțită folosită în experiment, au fost urmați următorii pași: (a) colectare; (b) sortare; (c) spălare și curățare; și (d) concasare Figura II.1.

- (a) Colectarea: Sticlele goale sunt colectate separat de alte tipuri de deșeuri în containere speciale pentru reciclare. Acestea pot fi plasate în zone publice, cum ar fi parcurile, sau depozitate în containere speciale la domiciliu pentru a fi colectate ulterior;
- (b) Sortarea: După colectare, sticlele sunt separate în funcție de culoare. Sticlele transparente, verzi și maro sunt sortate pentru a evita contaminarea culorilor și pentru a obține sticlă de calitate superioară în procesul de reciclare;
- (c) Spălare și curățare: Sticlele sunt apoi spălate pentru a elimina orice reziduuri rămase în interiorul lor. Această etapă de curățare este importantă pentru a obține o sticlă curată și de înaltă calitate;
- (d) Concasarea: s-a realizat cu o mașină de zdrobire a sticlei Grntr 60 Figura II.2., certificată CE, fabricată în Italia, -comandă cu role cu reductor de viteze, -rolele sunt realizate din oțel de înaltă rezistență, -racord pentru aspirarea prafului, -întrerupător de siguranță la deschiderea ușii de încărcare, -cernere manuală cu tavă de colectare a prafului, -cu care se obține o granulație de 0,5 până la 4 mm. Figura 13. Informații suplimentare: lățime: 52 cm, adâncime: 60 cm, înălțime: 113 cm, greutate: 95 kg, putere: 0,37Kw, tensiune: 380 V.

PROCESSUL DE RECICLARE CU CIRCUIT ÎNCHIS



Figura II.1. Procesul de reciclare cu circuit închis



Figura II.2. Grntr 60 (a) [17], Sticlă reciclată și zdrobită (RCG) (b) și (c).

2.2.2. Analiza microscopică și caracterizarea dimensională a particulelor de sticlă reciclată și concasată

Dimensiunile particulelor de sticlă reciclată constituie un parametru critic în optimizarea

proceselor de tratament termic aplicate materialelor vitroase. Granulometria sticlei influențează direct cinetica topirii, eficiența transferului de căldură, precum și caracteristicile fizic o-chimice ale produsului final. Studiile din domeniul reciclării materialelor evidențiază faptul că particulele de dimensiuni reduse prezintă o suprafață specifică mai mare, ceea ce favorizează procesele de absorbție și disipare a energiei termice. Această particularitate conduce la o topire mai rapidă și mai uniformă, reducând consumul energetic și timpul de procesare. În plus, dimensiunile mici ale fragmentelor minimizează riscul apariției de incluziuni solide sau zone insuficient topite, care pot compromite omogenitatea masei vitroase obținute.

Pe de altă parte, particulele de dimensiuni mari se caracterizează printr-o inerție termică crescută, necesitând perioade mai lungi de încălzire pentru a atinge temperatura de fuziune. Acest fenomen nu doar că diminuează eficiența energetică a procesului, dar poate conduce și la formarea de defecte structurale, precum tensiuni interne sau porozități reziduale. În contextul proceselor de sinterizare și vitrifiere, distribuția granulometrică a materialului concasat determină densitatea compactării și, implicit, proprietățile mecanice și optice ale produsului final. O fracționare optimă a dimensiunilor particulelor permite obținerea unor structuri dense, omogene și cu performanțe funcționale superioare. Astfel, controlul dimensiunilor particulelor de sticlă reciclată și concasată reprezintă o etapă fundamentală în lanțul tehnologic al tratamentelor termice, având implicații directe asupra sustenabilității proceselor industriale și asupra calității materialelor vitroase rezultate.

Măsurarea diametrului mediu pentru acest studiu, se face prin metode de cernere (uscată sau umedă) sau prin difracție laser, o tehnică utilizată pentru particulele de carbonat de calciu pur, care necesită luarea în considerație a factorului de formă dedus din morfologie. Distribuția granulometrică se face cu un difractometru pentru analiza dimensiunii particulelor tip SALD-7001, echipat cu laser Figura II.3. Acesta măsoară dimensiunea particulelor în intervalul 15 nm (0.015 mm) la 500 mm. Probele au fost preparate în prealabil în vederea asigurării dispariției aglomerărilor într-o baie cu ultrasunete.

Este important să se stabilească metode de măsurare corespunzătoare și să se monitorizeze dimensiunile granulelor de sticlă concasate pentru a asigura conformitatea cu specificațiile de producție și pentru a garanta că sticla reciclată poate fi utilizată în aplicațiile dorite cu eficiență.

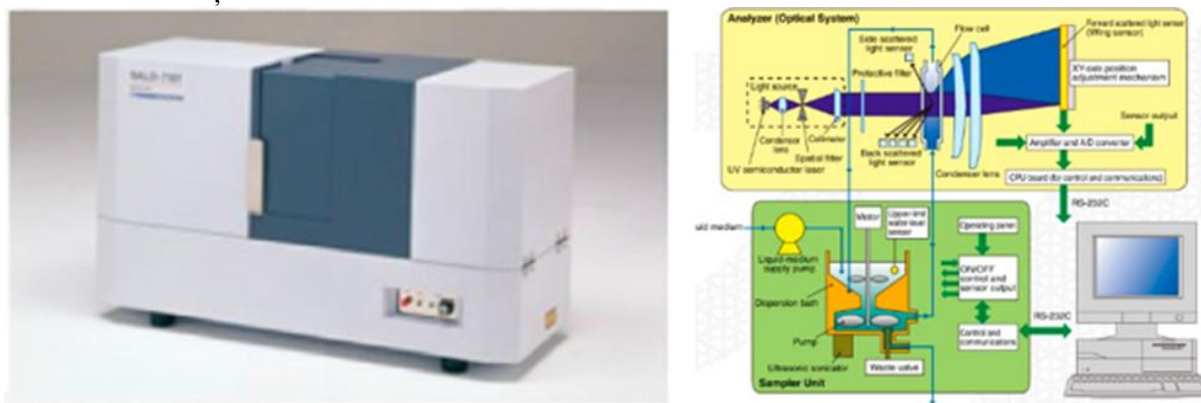


Figura II.3. SALD-7001

Analiza granulometrică a sticlei reciclate și concasate, realizată cu ajutorul aparatului **SALD-7001**, a permis caracterizarea precisă a distribuției dimensiunilor particulelor prin metoda difracției laser. Această tehnică are avantajul unei rezoluții ridicate și al posibilității de a determina rapid fracțiile granulometrice pe un interval larg de dimensiuni, de la câțiva

nanometri până la sute de microni. Rezultatele obținute au evidențiat faptul că particulele de sticlă prezintă o distribuție eterogenă, caracterizată printr-o predominanță a fracțiilor cu dimensiuni sub 100 μm , dar și prin prezența unor aglomerate de particule mai mari, provenite din procesul de concasare incompletă. Distribuția granulometrică multinodală sugerează existența unor diferențe semnificative între particulele primare și cele secundare rezultate din fragmentare.

Valoarea medie a diametrului particulelor (D50) a fost situată în intervalul specific materialelor vitroase concasate pentru reutilizare industrială, confirmând potențialul acestora în procese precum sinterizarea sau topirea controlată. În plus, analiza fracțiilor fine (sub 50 μm) a arătat o suprafață specifică ridicată, ceea ce favorizează transferul termic și contribuie la reducerea consumului energetic în etapele ulterioare de tratament. Prin urmare, utilizarea aparatului SALD-7001 a permis nu doar determinarea exactă a dimensiunilor particulelor de sticlă reciclată, ci și evidențierea corelației dintre distribuția granulometrică și comportamentul materialului în procesele de prelucrare termică. Aceste date constituie o bază esențială pentru optimizarea etapelor tehnologice și pentru creșterea eficienței reciclării sticlei în circuit industrial închis, Figura II.4.

Analiza microscopică a particulelor de sticlă reciclată și concasată reprezintă o etapă fundamentală în caracterizarea morfologică a materialelor vitroase utilizate în procesele de reciclare și valorificare. Observațiile efectuate prin microscopie optică și electronică au evidențiat faptul că fragmentele de sticlă rezultate în urma concasării prezintă frecvent muchii și unghiuri ascuțite, caracteristice mecanismului de fractură casantă al sticlei. Aceste margini neregulate și colțuri pronunțate influențează atât comportamentul mecanic al particulelor în amestecuri granulare, cât și interacțiunea lor cu fluxurile termice. Prezența unghiurilor ascuțite favorizează o suprafață specifică mai mare, ceea ce intensifică schimburile de căldură în timpul tratamentelor termice și accelerează procesele de topire și de sinterizare. Totodată, la nivel microscopic, aceste zone constituie puncte de inițiere pentru procesele de compactare și pentru reducerea porozității în structurile finale.

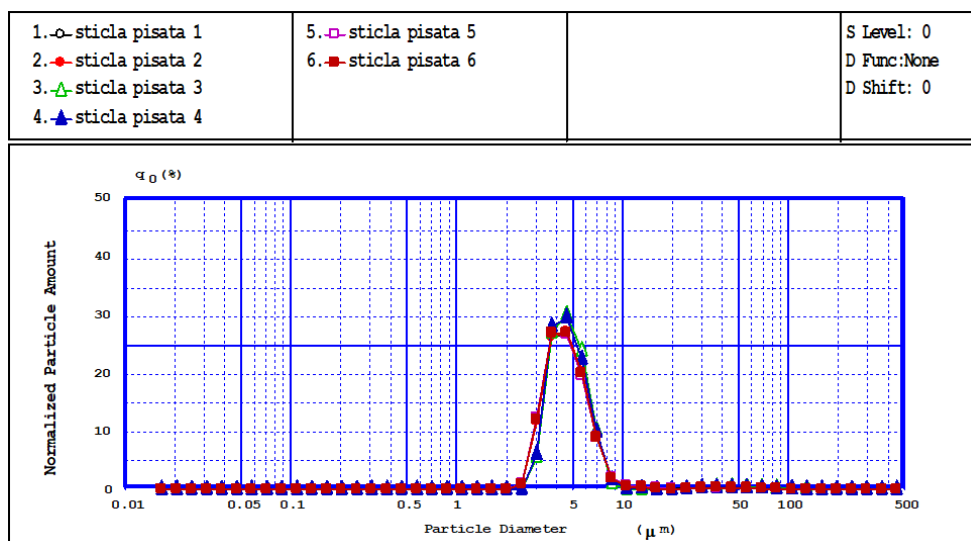


Figura II.4. Analiza granulometrică cu SALD-7001

Dimensiunile mici ale particulelor de sticlă prezintă o importanță deosebită, întrucât fragmentele fine se topesc mai rapid și mai uniform comparativ cu particulele de dimensiuni mari. Această proprietate contribuie la scăderea consumului energetic și la obținerea unor mase

vitroase mai omogene, cu un grad redus de defecte structurale. De asemenea, particulele fine cu suprafață specifică ridicată se distribuie mai eficient în amestecuri, facilitând procesele de densificare și asigurând proprietăți mecanice superioare produselor reciclate.

În concluzie, caracterizarea microscopică relevă faptul că morfologia neregulată, unghiurile ascuțite și dimensiunile reduse ale particulelor de sticlă concasată reprezintă factori determinanți pentru performanța proceselor termice ulterioare. Înțelegerea acestor aspecte permite optimizarea etapelor tehnologice din cadrul reciclării și valorificării sticlei, consolidând astfel rolul acesteia în economia circulară.

2.2.5. Tratarea termică a sticlei reciclate și concasate

2.2.5.1. Elaborarea probelor

Pregătirea probelor este o etapă crucială în procesul de fabricare a materialelor pentru tratarea termică și evaluarea caracteristicilor fizic-o-chimice. Acest proces include mai multe etape pentru a se asigura că amestecul este bine omogenizat și pigmentul este distribuit uniform, rezultând un produs final cu calități precum rezistență, culoare stabilă și performanțe mecanice îmbunătățite.

După prepararea sticlei și a pigmentului, urmează amestecarea acestora, sticla reciclată concasată 100g și pigmentul 5-10g într-un recipient curat și efectuăm amestecarea manuală. Este important ca amestecul să fie omogen și pigmentul să fie distribuit uniform în masa de sticlă pentru a evita formarea de zone cu concentrație mai mare de pigment, ceea ce ar putea duce la variații de culoare sau textură în materialul final. Tabelul II.1.

Odată ce amestecul de sticlă reciclată și pigment este complet omogenizat, acesta este turnat într-o matriță cu dimensiunea de 5/5 cm pentru a crea probele care vor fi supuse tratamentului termic. Cantitatea de 100 g de sticlă reciclată și 5-10 g de pigment este distribuită uniform în matriță, asigurându-se că fiecare probă are dimensiunea și grosimea corecte pentru a permite un tratament termic eficient. Figura II.16.

Este important ca probele să fie așezate corect în matrițe pentru a preveni deformarea sau crăparea acestora în timpul procesului de sinterizare.

2.2.5.2. Aplicarea tratamentului termic

Tratamentul termic în trei etape este un proces esențial în prelucrarea sticlei reciclate și a sticlei sparte, conceput pentru a îmbunătăți proprietățile fizico-chimice ale materialului. Acest proces controlează structura cristalină, durata de viață și comportamentul sticlei în condiții de utilizare intensă, cum ar fi în construcții sau aplicații de mozaic. Tratamentele termice se efectuează în trei etape specifice: încălzire treptată, menținere la o temperatură constantă (sinterizare) și răcire controlată.

Tratamentul termic în etape va fi realizat cu un cuptor electric Nabertherm30-3000 - MODELE CU TEMPERATURA MAXIMA 1200 GRADE C: L 1/12 – L 40/12. Figura II.17.

Caracteristici generale:

- temperatura maximă 1200 grade C;
- încălzire din doua părți cu plăci ceramice
- plăci de încălzire ceramice cu elemente de încălzire integrate ce sunt rezistente la fum și scurgeri, și sunt foarte ușor de înlocuit
- carcasa fabricată din tablă de oțel
- carcasa dublă pentru temperaturi extrem de mici
- gura de admisie aer ajustabil – în ușă
- gura exhaustoare aer în partea din spate
- releu solid pentru operare silențioasă
- NTlog Basic pentru controlerul Nabertherm



Figura II.17. Pregătirea probelor pentru tratament termic.

În prima etapă, un cuptor specializat încălzește treptat sticla reciclată la o temperatură controlată. Scopul acestei etape este de a evita șocurile termice care pot duce la crăparea materialului. Temperatura inițială de încălzire este de aproximativ 350 °C până la 450 °C, iar încălzirea se face lent, cu o viteză de aproximativ 5-10 °C pe minut, până când se atinge temperatura dorită pentru etapa de sinterizare.

Această etapă are rolul de a elimina umezeala din sticlă și de a permite expansiunea uniformă a particulelor fără a genera tensiuni interne. În această fază, materialul este încă departe de temperatura de topire, iar scopul este de a pregăti sticla pentru cristalizare fără a provoca topirea prematură.

Tabelul II.1. Elaborarea probelor

A doua etapă, după ce sticla a atins temperatura dorită, între 600 °C și 900 °C, urmează etapa de sinterizare. În această fază, sticla este menținută la o temperatură constantă timp de 30 până la 120 de minute, în funcție de tipul de sticlă reciclată și de specificațiile procesului. Scopul sinterizării este de a permite particulelor de sticlă să se topească, formând o masă mai omogenă, dar fără a atinge punctul de topire complet al materialului.

Această etapă are rolul de a controla procesul de cristalizare a sticlei. În funcție de temperatura și durata sinterizării, se formează fazele cristaline dorite, care îmbunătățesc proprietățile mecanice și termice ale materialului. În această perioadă, pigmentul adăugat la amestecul de sticlă va începe să reacționeze cu matricea de sticlă, conferind materialului culoarea și stabilitatea dorite în condiții de temperatură ridicată.

A treia etapă, după sinterizare, este etapa de răcire controlată, care este esențială pentru a preveni formarea de tensiuni interne și pentru a menține integritatea structurală a materialului.

S/NR	SRC/g	SRC/mm	PC/PO	Ct/g
P1	100g	< 1mm	-	0g
P2	100g	< 1mm	TiO ₂	5g
P3	100g	>1mm	TiO ₂	10g
P4	100g	>1mm	CK11020	>5g
P5	100g	>1mm	CK33100	>5g

Răcirea trebuie să fie graduală, la o viteză de aproximativ 5-10 °C pe minut, până când

temperatura sticlei ajunge sub 200 °C. Acest lucru se poate face într-un cuptor sau în aer, în funcție de echipamentul disponibil.

Răcirea lentă este importantă pentru a preveni formarea de fisuri sau crăpături în material, care pot apărea din cauza diferențelor de temperatură între straturile interne și externe ale sticlei. Această etapă permite, de asemenea, cristalizarea finală a sticlei și asigură o structură omogenă și compactă.

Tratamentul termic în trei etape al sticlei reciclate și al sticlei sparte este un proces controlat care include încălzirea treptată, sinterizarea la temperaturi ridicate și răcirea controlată. Aceste etape sunt esențiale pentru obținerea unor proprietăți mecanice și chimice superioare ale sticlei tratate, cum ar fi o rezistență mai mare la șocuri termice și mecanice, stabilitatea culorii și o durabilitate mai mare în utilizările industriale și civile. În funcție de parametrii specifici (temperaturi și durate), procesul poate fi ajustat pentru a îndeplini cerințele aplicațiilor finale ale materialului.

Probele SRC au fost supuse unei serii de tratamente termice în etape pentru a obține formarea și transformarea fazelor cristaline la diferite valori de bazicitate și temperaturi de sinterizare:

- PT1. Temperatură maximă de 750 °C cu o treapta de sinterizare de 60 de minute, Figura II.17;

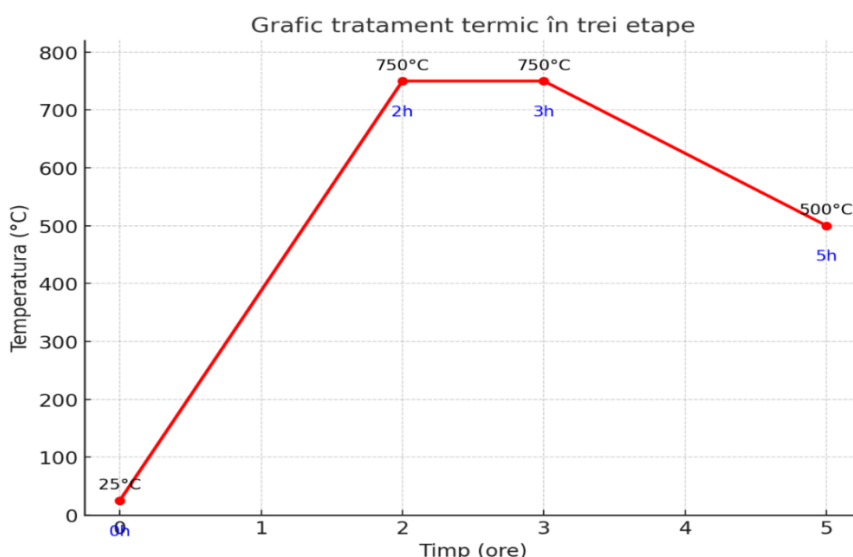


Figura II.17. Graficul pentru tratamentul termic de 750°C

- PT2. Temperatură maximă de 850 °C cu o treapta de sinterizare de 60 de minute, Figura II.18;

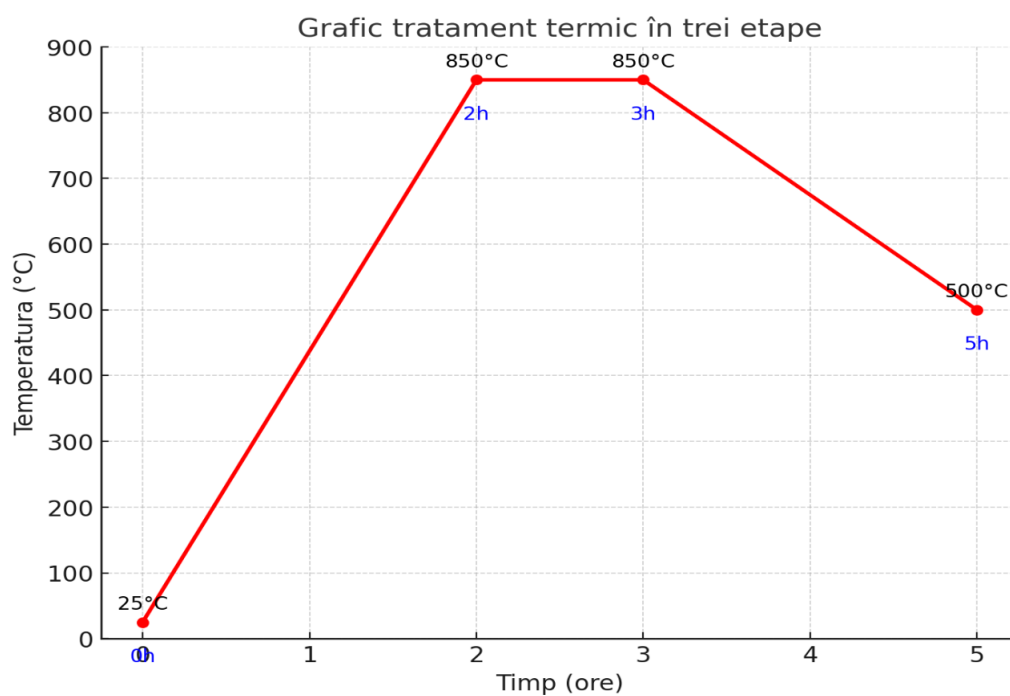


Figura II.18. Graficul pentru tratamentul termic de 850°C

- PT3. Temperatură maximă de 890 °C cu o treapta de sinterizare de 60 de minute, Figura II.19;

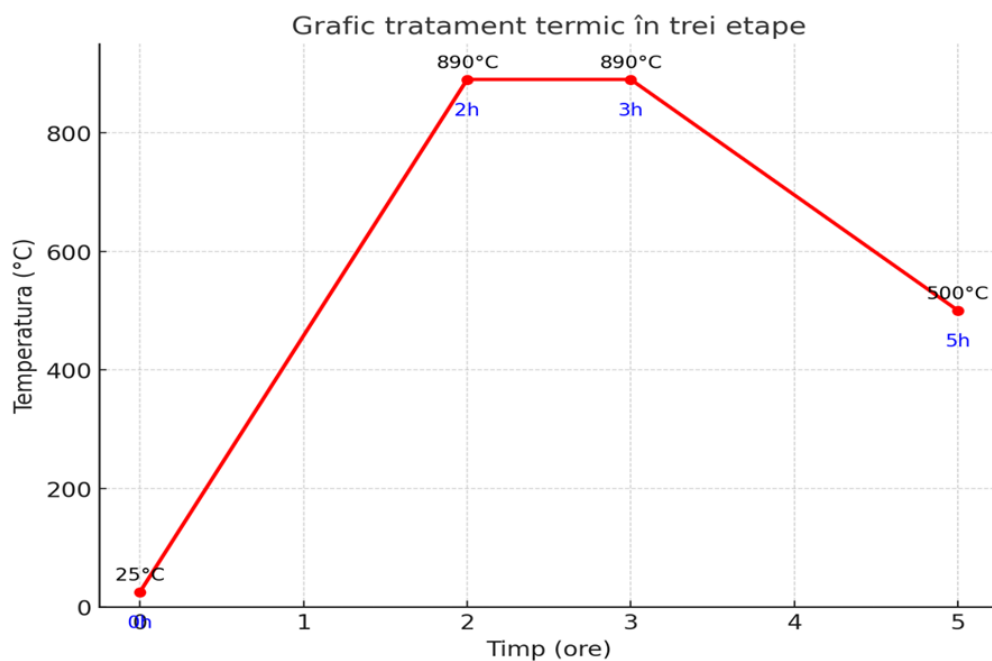


Figura II.19. Graficul pentru tratamentul termic de 890°C

- PT4. Temperatură maximă de 900 °C cu o treapta de sinterizare de 60 de minute, Figura II.20;

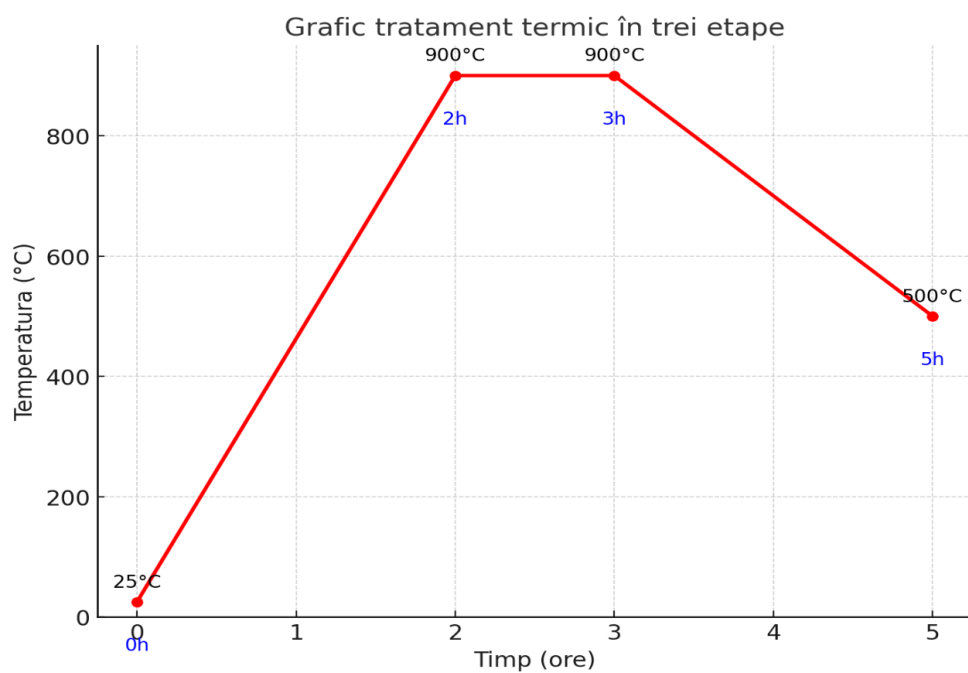


Figura II.20. Graficul pentru tratamentul termic de 900°C

- PT5. Temperatură maximă de 890 °C cu o treapta de sinterizare de 120 de minute, Figura II.21.

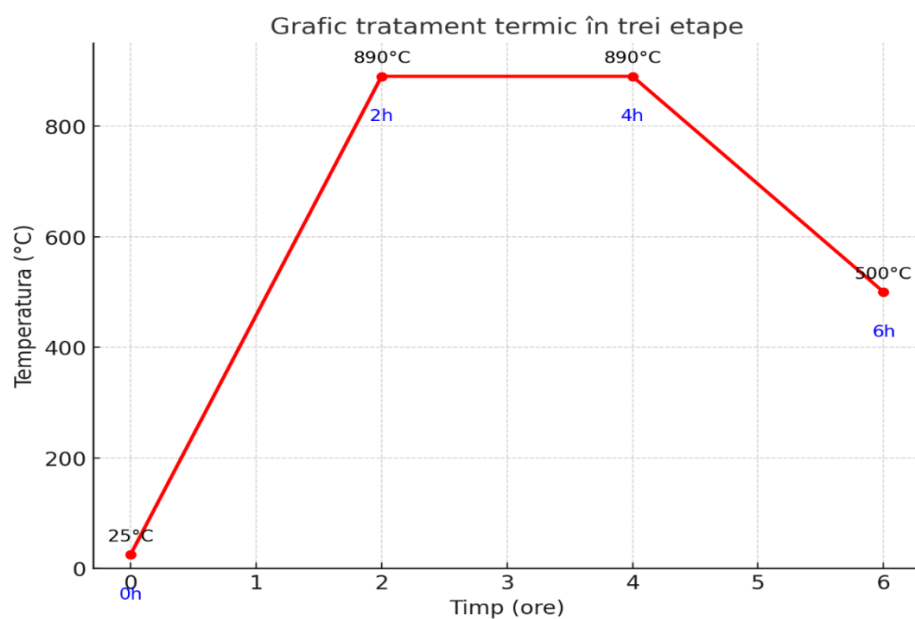


Figura II.21. Graficul pentru tratamentul termic de 890°C cu un prag de 120 minute.

CAPITOLUL IV

ANALIZA MICROSCOPICĂ ȘI PRIN DIFRACTIE DE RAZE X A PROBELOR DE STICLĂ RECICLATĂ ȘI CONCSATĂ ȘI TRATATĂ TERMIC

4.1. Evaluarea probelor

După analizarea probelor SRC tratate termic, am constatat că temperatura optimă pentru crearea și modificarea structurilor cristaline în sticla reciclată tratată termic este de 890 °C, cu o durată de 120 minute, o dimensiune a granulelor de 0,15-2 mm și utilizarea a 5 g de pigment la fiecare 100 g de SRC. Acest lucru sugerează că aceste condiții de tratament termic sunt eficiente în promovarea proceselor de cristalizare și transformare de fază în material. De asemenea, este important de menționat că probele tratate termic la o temperatură de 750 °C, cu un prag de 60 de minute, nu au avut un proces complet de formare a fazei cristaline și s-a observat temperatura de sinteză. Acest lucru poate indica faptul că temperatura și/sau durata tratamentului termic nu au fost suficiente pentru a promova cristalizarea completă a sticlei reciclate în aceste condiții. Figura IV.1. Probele SRC cu o cantitate de pigment de 10 g/100 g au suferit modificări plastice vizibile și fisuri. Figura IV.2.

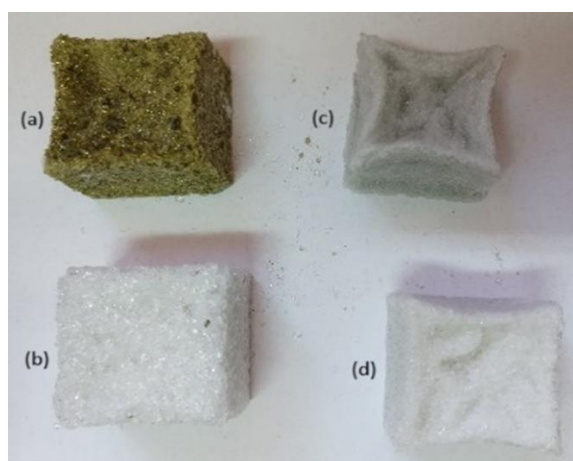


Figura IV.1. Mostre SRC tratate termic la o temperatură de 750 °C și un prag de 60 min, a și b – dimensiunea granulelor de 4,9–5 mm, c și d – dimensiunea granulelor de 0,15–10 mm.

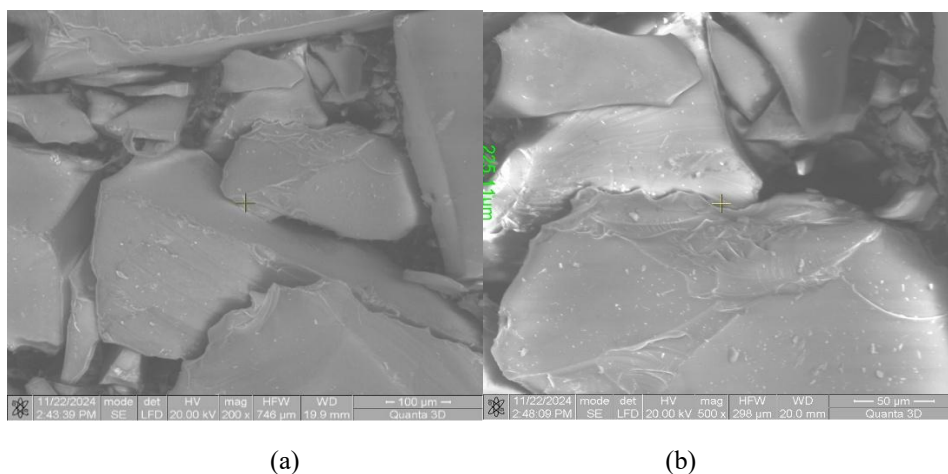


Figura IV.2. Analiza morfologică SRC tratate termic la o temperatură de 750 °C și un prag de 60 min (a-200x și b-500x)

Temperatura de 900 °C poate fi suficient de ridicată pentru a favoriza procesul de cristalizare și sinterizare în sticlă. Dacă se dorește, se poate utiliza acest tratament termic pentru a induce formarea și transformarea fazelor cristaline în material. Tratamentul termic la temperaturi ridicate poate îmbunătăți rezistența mecanică și duritatea SRC. Aceste proprietăți pot fi utile în aplicații care necesită materiale mai durabile și mai rezistente. În același timp, contribuie la eliminarea impurităților și defectelor din sticlă. Prin procese precum topirea și restructurarea materialului, poate îmbunătăți omogenitatea și puritatea sticlei tratate termic, dar poate afecta pigmentii ceramici care au o temperatură de utilizare mai scăzută. Tratamentul termic la temperaturi ridicate poate influența, de asemenea, conductivitatea termică și dilatarea termică a SRC. Aceste modificări pot fi utile în aplicații care implică izolația termică sau comportamentul termic al materialelor.

Probele SRC tratate termic la o temperatură de 890 °C, un prag de 120 min. și o dimensiune a granulelor între 0,15 și 2 mm sunt mai compacte și mai omogene. Această constatare poate fi asociată cu mai multe aspecte legate de structura și compoziția materialului, precum și de procesul de tratare termică în sine. Particulele de sticlă cu o dimensiune mai fină a granulelor pot tinde să se compacteze mai bine în timpul tratării termice. Acest lucru poate duce la formarea unei structuri mai dense și mai compacte în materialele tratate termic, poate avea o distribuție mai uniformă și o orientare mai bună în matricea materialului și poate contribui la formarea unei structuri mai omogene și mai uniforme în interiorul materialului. Granulația mai fină poate contribui la o distribuție mai uniformă a impurităților și defectelor din material, ceea ce poate îmbunătăți omogenitatea și calitatea generală a sticlei tratate termic. Figura IV.3 și Figura IV.4 .



Figura IV.3. Eșantion SRC tratat termic la o temperatură de 900 °C și un prag de 60 min, dimensiunea granulelor de 0,15–2 mm, $\text{TiO}_2/10\text{g}$,

4.2. Analiza microstructurii și difracție de raze x a sticlei reciclate și tratate termic prin microscopie optică

Datorită microscopiei electronice (100x, 200x, 500x, 1000x, 5000x) pentru probele SRCT (sticlă reciclată zdrobită și tratată termic) la 890 °C, cu o limită de timp de 120 minute și o gamă de dimensiuni de 0,15-2 mm, se observă că acestea pot ajuta la amestecarea impurităților sau a altor materiale nedorite în structura materialului, ceea ce reduce porozitatea și îl face mai uniform, eliminând în același timp gazele și substanțele volatile din material, contribuind la reducerea porilor și la compactarea materialului, Figura IV.5. [31].

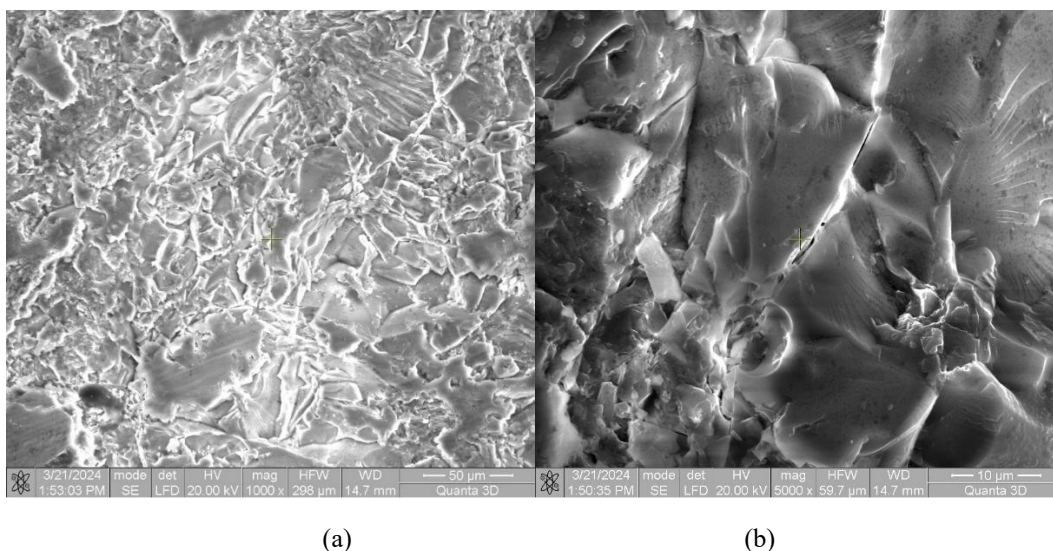


Figura IV.4. Analiza morfologică SRC tratate termic la o temperatură de 900 °C și un prag de 60 min, dimensiunea granulelor de 0,15–2 mm, $\text{TiO}_2/10\text{g}$, (a-1000x și b-5000x)

Sticla reciclată reprezintă o resursă importantă pentru obținerea unor materiale sustenabile, cu aplicabilitate în domeniul construcțiilor, designului interior și artei decorative. Pentru a putea fi utilizată în aplicații avansate, este necesară supunerea acestora unor procese de tratament termic controlat, menite să îi îmbunătățească proprietățile mecanice, structurale și chimice. În cadrul acestui studiu, sticla reciclată a fost supusă unui tratament termic la 890 °C, urmat de o treaptă de coacere de 120 minute, proces ce a condus la formarea unei microstructuri stabile și compacte. Pentru caracterizarea detaliată a materialului, s-a utilizat microscopia electronică de baleiaj (SEM), o tehnică de investigație de înaltă rezoluție, capabilă să evidențieze morfologia, gradul de omogenitate și eventualele defecte interne.

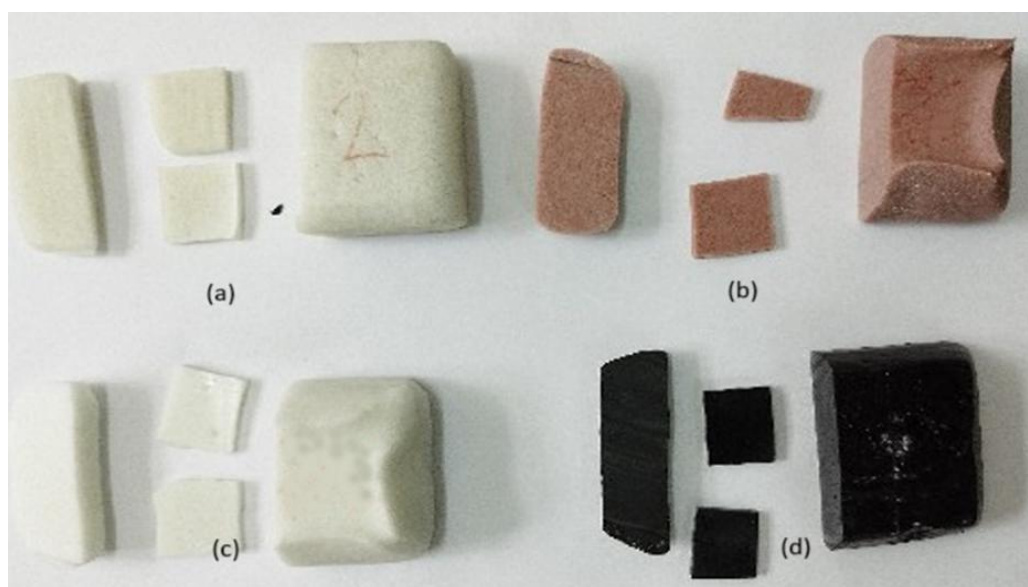


Figura IV.5. Eșantion SRC tratat termic la o temperatură de 890 °C și un prag de 120 min, cu o dimensiune a granulelor de 4,9–5 mm, b, c și d cu dimensiuni ale granulelor de 0,15–2 mm, $\text{TiO}_2/5\text{g}$,

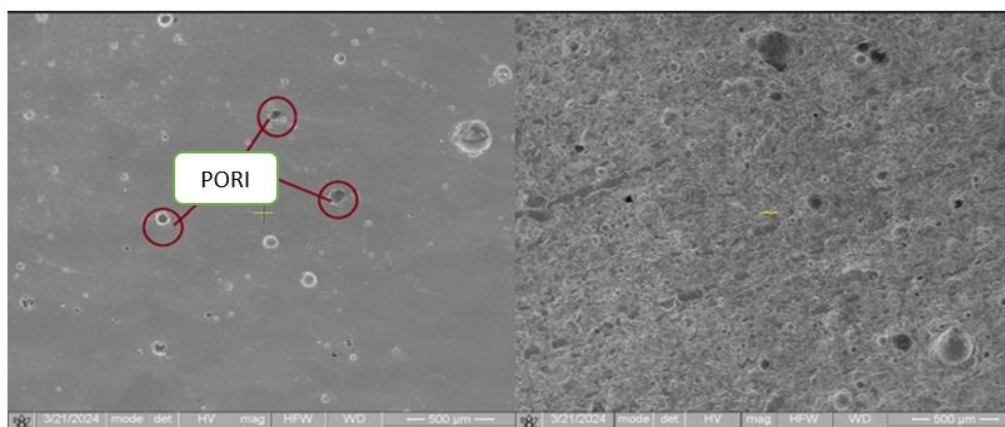
Microscopia electronică de baleiaj (SEM) se bazează pe interacțiunea unui fascicul focalizat de electroni cu suprafața probei, generând semnale secundare și împrăștiate, care sunt convertite în imagini de înaltă rezoluție. În cazul sticlei reciclate tratate termic la 890 °C,

probele au fost preparate prin secționare și montare pe suporturi metalice, fiind ulterior acoperite cu un strat subțire de aur pentru a asigura conductivitatea necesară analizelor. SEM a permis obținerea unor imagini cu o rezoluție de ordinul nanometrilor, relevând structura superficială și distribuția fazelor interne.

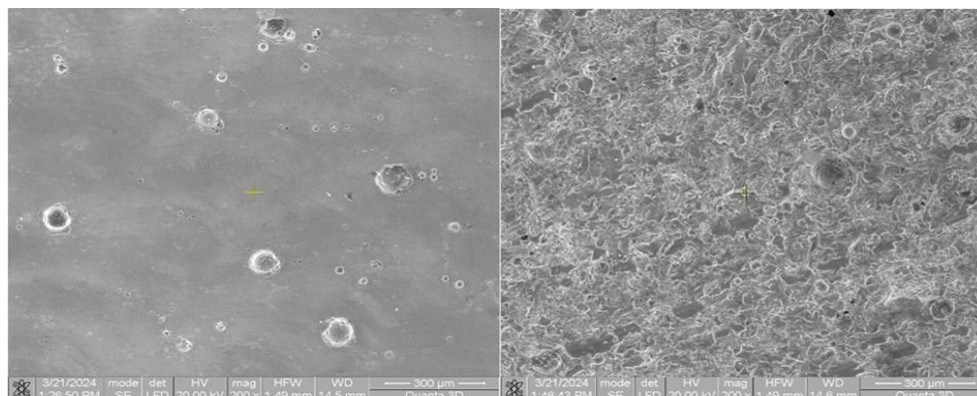
Analizele SEM efectuate asupra probelor de sticlă reciclată și tratată termic au evidențiat o serie de trăsături relevante pentru calitatea materialului:

1. Compactitatea și omogenitatea structurii – Imaginile SEM au arătat o microstructură densă, cu o distribuție uniformă a componentelor, lipsită de porozități majore. Acest aspect confirmă faptul că tratamentul la 890 °C, urmat de menținerea la această temperatură timp de 120 minute, a condus la relaxarea tensiunilor interne și la închiderea porilor reziduali.
2. Reducerea defectelor microstructurale – În comparație cu sticla netratată, probele analizate au prezentat o scădere semnificativă a micro-fisurilor și a discontinuităților interne. Această îmbunătățire este asociată procesului de coacere, care permite difuzia atomilor în rețeaua amorfă și formarea unor legături mai stabile.
3. Formarea unor regiuni parțial cristalizate – SEM, corelat cu analiza difracției de raze X (XRD), a indicat apariția unor nuclee cristaline fine dispersate în matricea amorfă. Aceste zone de cristalinitate contribuie la creșterea rezistenței mecanice și la stabilitatea termică a materialului.
4. Suprafața netedă și uniformă – Analizele la scară micrometrică au arătat o topografie netedă, fără asperități sau denivelări semnificative. Acest aspect confirmă faptul că procesul de coacere asigură o consolidare uniformă a structurii, ceea ce reprezintă un avantaj pentru aplicațiile decorative sau arhitecturale, unde estetica are un rol esențial.

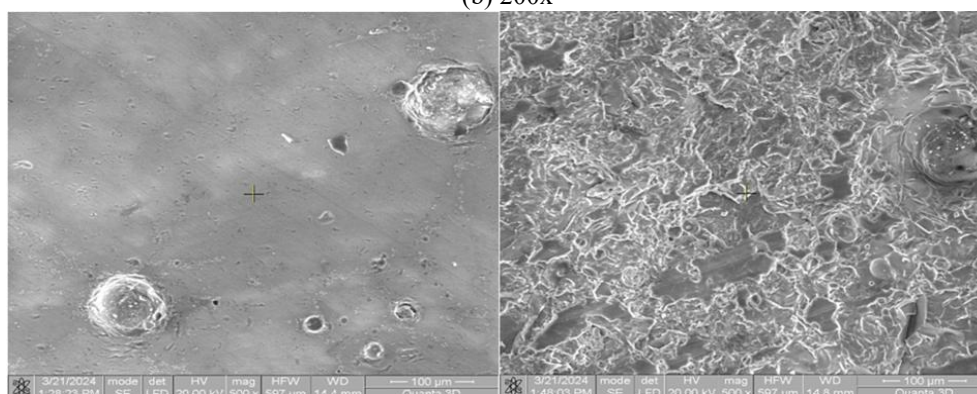
Observațiile SEM au fost corelate cu testele de rezistență la compresiune și microduritate Vickers, care au arătat o creștere semnificativă a performanțelor mecanice. Compactitatea și reducerea porozității identificate prin microscopie justifică aceste valori ridicate, confirmând rolul tratamentului termic în îmbunătățirea proprietăților materialului. De asemenea, analiza chimică EDS (Energy Dispersive Spectroscopy), integrată în SEM, a arătat o distribuție uniformă a oxizilor principali (SiO_2 , Na_2O , CaO), fără segregări evidente, ceea ce explică rezistența chimică ridicată a probelor testate în soluții acide și bazice.



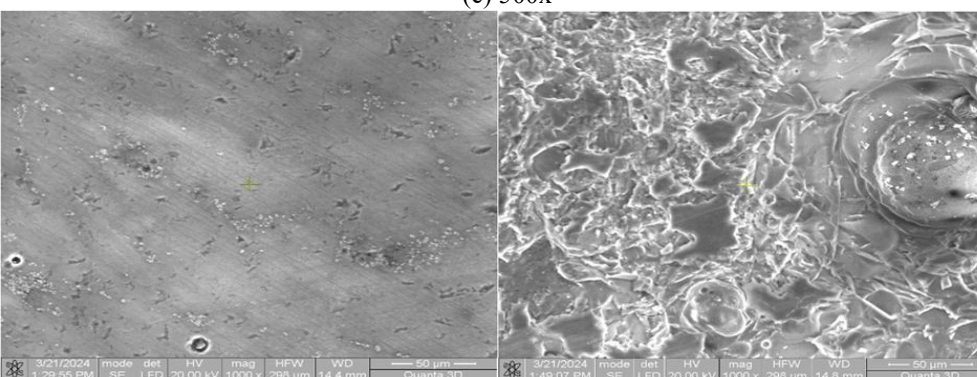
(a) 100x



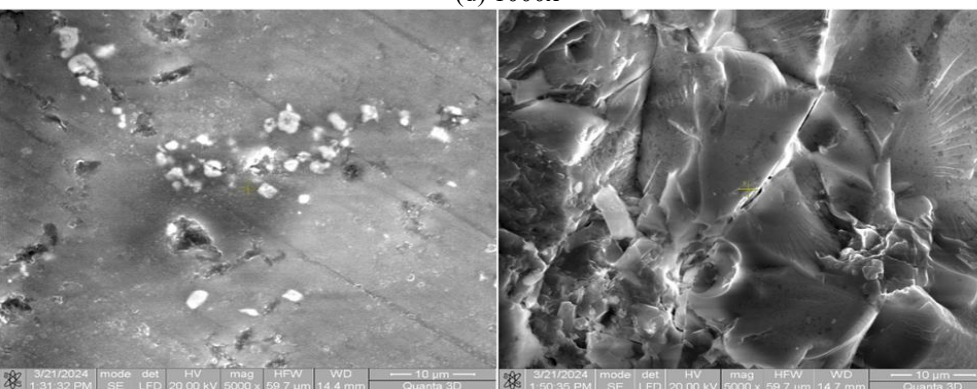
(b) 200x



(c) 500x



(d) 1000x



(f) 5000x

Figura IV.6. Probă de SRC tratată termic la o temperatură de 890°C și un prag – coloana din stânga 60 min., coloana din dreapta de 120 min, granulație de 0,15 – 10 μm. a- 100X, b-200X, c-500X, d-1000X și f- 5000X.

În urma analizei microscopice a SRC_T în comparație cu Murano și DGM-China, se observă că este un material compact și omogen, care are o rezistență structurală mai mare, ceea ce îl face mai capabil să reziste la sarcini și solicitări mecanice. Această proprietate poate fi deosebit de importantă în aplicații în care fiabilitatea și durabilitatea sunt esențiale. Absența fisurilor și porilor sugerează că compoziția materialului este uniformă în întreaga sa masă. Astfel de caracteristici pot fi cruciale pentru asigurarea consistenței și predictibilității în procesele de fabricație și în performanța produsului final. Absența fisurilor și porilor indică un proces de fabricație eficient și bine controlat. Astfel de rezultate pot duce la reducerea costurilor și la o producție mai consistentă și de înaltă calitate. Imaginile SEM au fost realizate la mărimi de 200x, 500x, 1000x și 5000x. Figura IV.7.

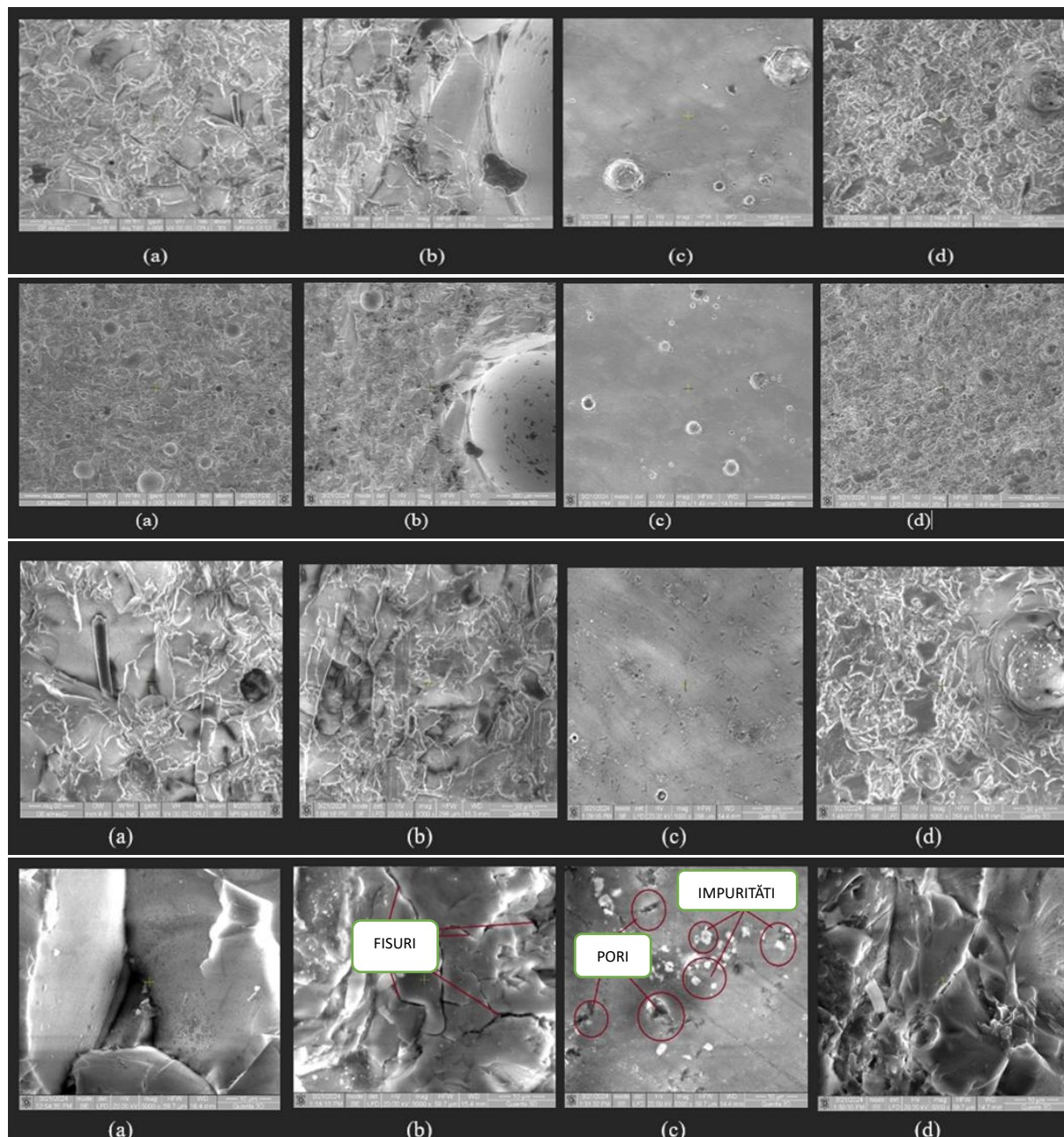


Figura IV.7. Imagini SEM: (a) – DGM, (b) – Murano, (c) – SRC_C și (d) – SRC_T

CAPITOLUL V

ANALIZA PROPRIETĂȚILOR MECANICE ALE STICLEI RECICLATE CONCASATE ȘI TRATATE TERMIC

5.1. Rezultatele analizei proprietăților tribologice a SRCT prin comparație cu Murano și Dynasty Smalti Glass Mosaic

Comportamentul tribologic al materialelor reprezintă un indicator fundamental al performanței lor în aplicații practice, în special acolo unde interacțiunea prin frecare și rezistența la uzură determină durabilitatea și eficiența în exploatare. În cazul materialelor vitroase, cum sunt mozaicurile decorative și sticla reciclată tratată termic (SRCT), coeficientul de frecare oferă informații esențiale privind calitatea suprafeței, gradul de compactitate și stabilitatea structurii.

Pentru determinarea coeficientului de frecare testele au fost efectuate printr-o mișcare de translație cu o forță de 10 N, probele fiind testate timp de 10 min. Datele obținute fiind afișate în Tabelul 6.1. Figura 6.1. Testele au fost efectuate pe patru probe după cum urmează:

- Proba 1 - Dynasty Smalti Glass Mosaic – China (DGM)
- Proba 2 - Murano – Italia
- Proba 3 - Sticlă reciclată concasată și tratată termic (SRCT) – ce conține 5g CK33100
- Proba 4 - sticlă reciclată concasată și tratată termic (SRCT) – ce conține 5g TiO₂

Tabelul V.1. Datele obținute în urma testelor efectuate pentru determinarea coeficientului de frecare prin mișcarea de translație.

Probe	P1	P2	P3	P4
N	10	10	10	10
COF	0,1661	0,1564	0,1239	0,1332

Analiza comparativă a comportamentului tribologic evidențiază diferențe clare între materialele de referință Murano și DGM și probele de sticlă reciclată tratată termic, rezultatele obținute demonstrând influența directă a microstructurii și a tratamentelor aplicate asupra coeficientului de frecare, mozaicul DGM–China înregistrând cea mai ridicată valoare de 0,1661, asociată cu o rugozitate accentuată și o tendință crescută la uzură, ceea ce indică prezența unor defecte structurale și a unor porozități care amplifică rezistența la alunecare, în timp ce mozaicul Murano–Italia a prezentat un coeficient intermediar de 0,1564, semnificativ inferior celui obținut pentru DGM și explicabil printr-o prelucrare de calitate superioară și o microstructură mai omogenă, dar care rămâne totuși mai ridicat decât valorile măsurate pentru sticla reciclată tratată termic, în special pentru varianta pigmentată CK33100 unde coeficientul de frecare de 0,1239 a fost cel mai scăzut, reflectând o structură compactă și uniformă obținută în urma tratamentului termic în trei etape (încălzire până la 890–900 °C, menținere și răcire controlată la 500 °C) și rolul pigmentului CK33100 în reducerea interacțiunilor tribologice la nivel de micro-contacte prin umplerea micro-defectelor și crearea unei suprafețe continue, confirmată de observațiile microscopice ce au arătat o distribuție uniformă a particulelor pigmentare, iar SRCT dopată cu TiO₂ a obținut o valoare a coeficientului de frecare de 0,1332, mai ridicată decât proba pigmentată CK33100, dar mult mai scăzută decât materialele de

referință Murano și DGM, ceea ce demonstrează că oxidul de titan conferă o bună stabilitate chimică și structurală prin inhibarea proceselor de degradare și prin îmbunătățirea rezistenței la medii acide și bazice, dar efectul său asupra comportamentului tribologic rămâne inferior celui produs de pigmenții ceramici, concluzionându-se astfel că sticla reciclată tratată termic nu doar că depășește materialele tradiționale în ceea ce privește coeficientul de frecare, dar prezintă și avantaje suplimentare legate de omogenitatea structurală, compactitate și potențial extins de utilizare în aplicații unde rezistența la uzură și stabilitatea sunt esențiale.

Rezultatele testelor tribologice arată că sticla reciclată tratată termic (SRC pigmentată și SRCT cu TiO_2) are performanțe superioare mozaicurilor tradiționale din Italia și China, datorită coeficientului de frecare semnificativ mai mic. Proba pigmentată cu CK33100 a oferit cea mai bună performanță, demonstrând un comportament optim la frecare și, implicit, o rezistență mai bună la uzură. Proba cu TiO_2 confirmă potențialul aditivilor funcționali în îmbunătățirea calităților sticlei reciclate, chiar dacă efectul asupra coeficientului de frecare este mai redus decât în cazul CK33100. Figura V.1.

Aceste rezultate susțin integrarea sticlei reciclate tratate termic în aplicații civile și decorative, oferind nu doar o alternativă sustenabilă, ci și o superioritate funcțională față de materialele tradiționale utilizate în prezent.

Graficul arată evoluția forței tangente F_x (curba neagră) și a coeficientului de frecare COF (curba verde) pe parcursul unei zgârieri de ~ 10 mm pe mozaicul DSM China. La început se observă o scurtă fază de rodaj: F_x crește treptat de la valori mici, iar COF oscilează în jurul unui nivel mediu, cu un vârf izolat $\sim 1,8$ – 2 mm – tipic ruperii unei asperități. Între ~ 3 și 6 mm apare un regim cvasi-staționar cu oscilații ritmice (stick-slip fin): atât F_x , cât și COF cresc gradual, atingând episoade locale maxime, ceea ce indică o frecare dominată de ploughing/micro-tăiere și interacțiuni cu „third-body” (debris fin). În jur de $6,7$ – 7 mm ambele scad simultan, semn al unei porțiuni mai netede/glazurate sau al evacuării temporare a particulelor. Ulterior, până la ~ 10 mm, curbele revin pe trend ascendent, cu COF stabilizat la un nivel mediu-ridicat și cu F_x mai mare, fără salturi catastrofale. Ansamblul sugerează un comportament tribologic stabil, de tip abraziv, influențat de neomogenități locale ale suprafeței; nu se evidențiază cedări sau instabilități majore. Pentru reducerea oscilațiilor și a frecării medii, ar fi utile o finisare/polish mai fin, controlul granulometriei particulelor din mozaic și, la nevoie, optimizarea încărcării cu pigment/oxizi pentru a limita nuclearea așchiilor Figura V.1.

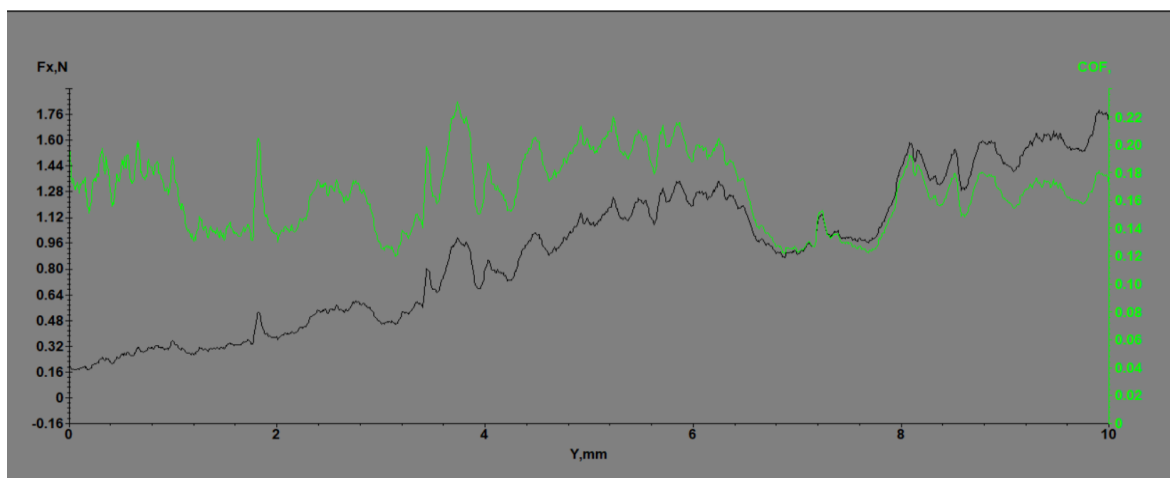


Figura V.1. Graficul rezultat pentru determinarea coeficientului Y de frecare prin mișcarea liniară a mozaicului DGM-China (P1)

Graficul tribologic Figura V.2. pentru mozaicul Murano arată o evoluție tipică zgârierii pe parcursul a ~10 mm, cu o fază de „rodaj” urmată de regim cvasi-staționar și episoade scurte de instabilitate. La început, F_x (forța tangentă, curba neagră) crește gradual de la valori mici, în timp ce COF (curba verde, axa dreaptă) se stabilizează rapid într-un interval aproximativ 0,12–0,20, cu oscilații fine specifice micro-aderenței/stick-slip. În zona 2,5–3 mm apare o scădere bruscă a COF urmată de revenire, interpretabilă ca desprinderea unei asperități sau evacuarea temporară a debrisiului; concomitent, F_x rămâne pe trend ascendent, semn că adâncimea șanțului crește progresiv prin ploughing/micro-tăiere. Între ~3 și 7 mm se observă un regim relativ stabil: COF fluctuează strâns în jurul unei medii ~0,16–0,18, iar F_x are un profil „în trepte”, ceea ce indică alternanța unor zone ușor diferite ca microduritate și micro-topografie. În jurul a ~8,2–8,6 mm se produce un nou eveniment tranzitoriu (minim al COF), urmat spre final de câteva vârfuri sincronizate ale COF și F_x , asociate cel mai probabil întâlnirii unor incluziuni mai dure sau agregate pigmentare. Lipsa unor salturi catastrofale și absența unui derapaj al sarcinii indică stabilitate tribologică bună în condițiile testului: frecarea este preponderent abrazivă, cu micro-cipări fragile caracteristice materialelor vitroase, dar fără degradări bruște ale pistei. Comparativ orientativ, nivelul mediu de COF este ușor mai mic decât la mozaicul DGM-China și ușor mai mare decât la compozitele pe bază de sticlă reciclată tratată termic optimizată, ceea ce confirmă pentru Murano un compromis rezonabil între aderență și rezistență la zgâriere. Pentru reducerea undulațiilor și a energiei disipate în contact se recomandă o finisare/polish mai fin, controlul micro-defectelor de suprafață și, acolo unde se urmărește scăderea frecării, utilizarea unor pigmenți ceramici cu inerție chimică ridicată și granulometrie bine controlată.

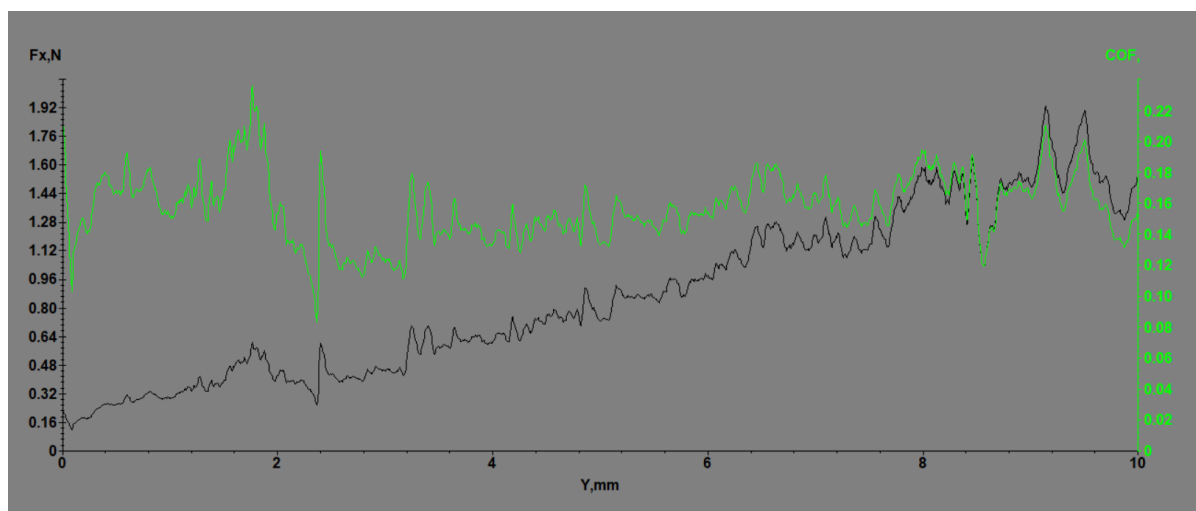


Figura V.2. Graficul rezultat pentru determinarea coeficientului Y de frecare prin mișcarea liniară a mozaicului de Murano (P2)

Graficul pentru proba SRC_C arată un contact de zgâriere dominat de frecare abrazivă stabilă, cu un scurt „rodaj” urmat de regim cvasi-staționar. La început, F_x (curba neagră) crește gradual de la valori mici, în timp ce COF (curba verde, axa dreaptă) se așază rapid într-un interval relativ îngust, cu undulații fine specifice micro-aderenței și micro-tăierii. Între ~4,8–5,3 mm apare un eveniment tranzitoriu bine marcat: COF are un minim brusc urmat de un vârf scurt, sincron cu o schimbare în trepte a lui F_x ; acest „impuls” este tipic unei discontinuități locale (desprinderea/înglobarea unei asperități sau eliberarea/aglomerarea de debrisi – third body). După acest punct, sistemul se stabilizează: COF revine la un nivel ușor mai mic și

rămâne strâns bandat, iar F_x continuă să crească lent pe un trend neted, indicând adâncirea progresivă a șanțului prin ploughing controlat și o pistă parțial „glazurată”. Absența salturilor catastrofale sau a derivațiilor mari ale sarcinii tangente sugerează stabilitate tribologică bună și o suprafață relativ omogenă, cu neomogenități locale izolate. În ansamblu, SRC_C manifestă o frecare medie redusă și bine controlată după rodaj, ceea ce indică o rezistență la zgâriere adecvată; pentru a diminua și mai mult oscilațiile se pot obține beneficii prin finisare mai fină și o distribuție granulometrică/pigmentară mai îngustă, care să limiteze evenimentele tranzitorii de tip stick-slip.

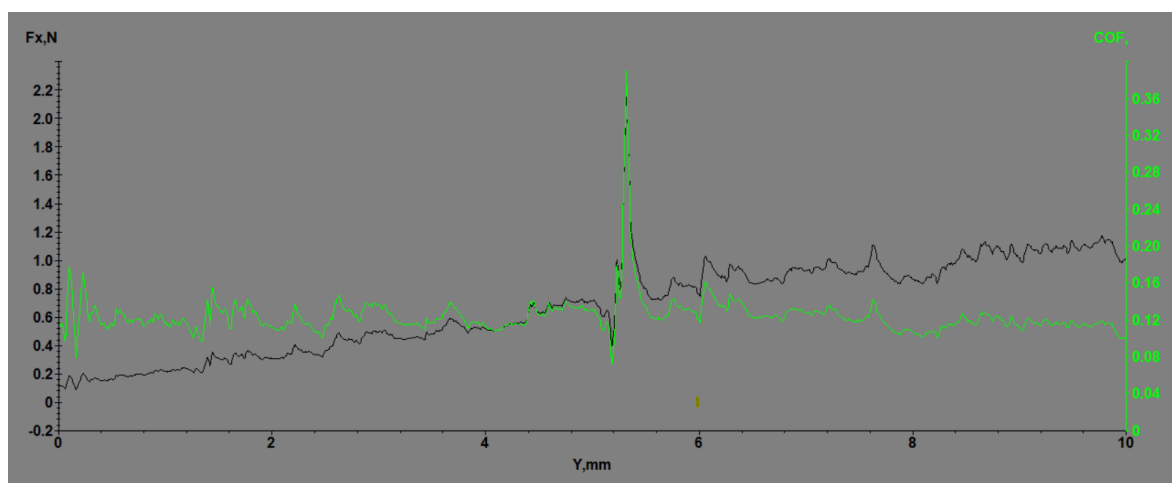


Figura V.3. Graficul rezultat pentru determinarea coeficientului Y de frecare prin mișcarea liniară a SRC_C (P3)

Graficul tribologic Figura V.4. pentru proba SRC_T arată un contact de zgâriere în mare parte stabil, cu două evenimente tranzitorii clare. După un rodaj foarte scurt, coeficientul de frecare (curba verde) se așază la valori relativ mici și strâns grupate, iar forța tangențială F_x (curba neagră) crește lent – semn că mecanismul dominant este ploughing moderat, fără rupere extensivă. În jur de ~3 mm apare un impuls scurt și sincron al COF și F_x , tipic întâlnirii unei neomogenități locale (asperitate dură/incluziune sau aglomerare de debris „third-body”); imediat după, sistemul revine la un regim liniștit, cu COF redus și fluctuații fine. Între ~3,2–8,5 mm curbele indică un comportament cvasi-staționar: F_x urcă ușor odată cu adâncirea șanțului, iar COF rămâne jos și bine controlat, ceea ce sugerează formarea unei pelicule compacte de resturi care stabilizează alunecarea. Spre ~8,7–9,0 mm se observă al doilea eveniment tranzitoriu (vârf scurt al ambelor mărimi), urmat din nou de stabilizare până la final, cu COF mic. Ansamblul este caracteristic unui material omogen și tenace, cu frecare medie scăzută și puține instabilități — în linie cu faptul că SRC_T (sticlă reciclată tratată termic) are, de regulă, un COF mediu mai mic și mai stabil decât Murano și DGM-China. Interpretarea practică: pista dezvoltă rapid o zonă „glazurată” care limitează variațiile frecării; vârfurile izolate marchează defecte punctuale ale suprafeței, nu o problemă sistemică, dar, per total, comportamentul indică rezistență bună la zgâriere și o interfață tribologică stabilă.

5.3. Determinarea rezistenței la compresiune a SRCT prin comparație cu Murano și Dynasty Smalti Glass Mosaic

Rezistența la compresiune este una dintre cele mai importante proprietăți mecanice în evaluarea materialelor fragile, precum sticla, ceramica și compozitele vitroase. În cazul sticlei reciclate concasate și tratate termic (SRCT), această proprietate este un indicator direct al eficienței tratamentelor aplicate și al rolului aditivilor utilizați. Studiul de față compară

performanțele mecanice ale probelor SRCT cu oxid titanic, cu SRCT ce conține pigment ceramic - CK33100, respectiv cu două materiale consacrate pe piață: mozaicul Murano (Italia) și mozaicul DGM (China).

Pentru determinarea rezistenței la compresiune și tensiuni normale probele folosite au avut o dimensiune de 10/10 mm, iar forța de compresiune având o viteză de 1mm pe minut. Testele au fost efectuate cu o mașină universală model WDW-50E. Datele obținute fiind afișate în Tabelul V.3. Figura V.8. Testele au fost efectuate pe patru probe după cum urmează:

- DSG_1- Dynasty Smalti Glass Mosaic – China (DGM)
- DSG_2- Dynasty Smalti Glass Mosaic – China (DGM)
- Murano_1 - Murano 1 – Italia
- Murano_2 - Murano 2– Italia
- SRC_C1 - Sticlă reciclată concasată și tratată termic (SRCT) – ce conține 5g CK33100
- SRC_C2 - Sticlă reciclată concasată și tratată termic (SRCT) – ce conține 5g CK33100
- SRC_T1 - Sticlă reciclată concasată și tratată termic (SRCT) – ce conține 5g TiO₂
- SRC_T2 - Sticlă reciclată concasată și tratată termic (SRCT) – ce conține 5g TiO₂

Table V.3. Datele obținute în urma determinării la compresiune și tensiuni normale la deformare

Probe	DSG_1	DSG_2	Murano_1	Murano_2	SRC_C1	SRC_C2	SRC_T1	SRC_T2
MPa	30	4	16	24	24	58	160	120
Forta(N)	2500	350	1800	2450	2450	5850	16000	12000

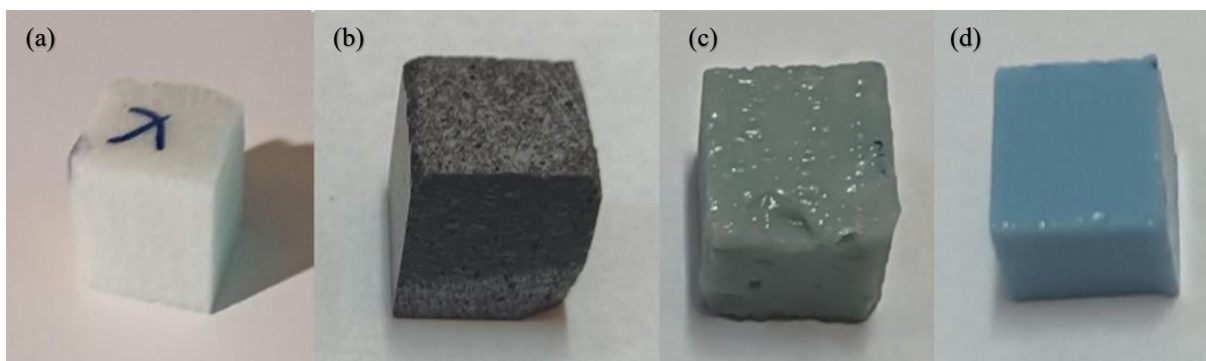


Figura V.8. Probele utilizate la determinarea la compresiune și tensiunile normale la deformare (a) – SRC_T, (b)-SRC_C, (c)- Murano și (d) – China DGM

Analiza comparativă a rezistenței la compresiune evidențiază diferențe semnificative între sticla reciclată tratată termic și materialele de referință Murano și DGM, valorile obținute confirmând superioritatea netă a probelor optimizate prin adaosuri oxido-ceramice. Proba SRCT–TiO₂ a înregistrat cea mai ridicată rezistență la compresiune, de 160 MPa, depășind de peste cinci ori valorile materialelor tradiționale și demonstrând rolul esențial al oxidului de titan stabilizarea structurii vitro-cristaline, proces ce conduce la reducerea porozității, la eliminarea micro-fisurilor și la obținerea unei microstructuri compacte, fapt confirmat și de rezultatele microscopice și ilustrat în Figura V.8. Proba SRCT pigmentată cu CK33100 a obținut o rezistență de 58 MPa, valoare inferioară variantei cu TiO₂, dar semnificativ superioară materialelor de referință, fiind de peste două ori mai mare decât cea a mozaicului Murano și aproape dublă față de DGM; această scădere comparativă se explică prin faptul că pigmentul

CK33100, deși contribuie la obținerea unor efecte cromatice și estetice deosebite, poate introduce discontinuități locale în rețeaua vitroasă și micro-defecte care diminuează parțial performanța mecanică globală, aspect prezentat în Figura V.9. În contrast, mozaicurile tradiționale Murano și DGM au obținut valori semnificativ mai reduse, respectiv 24 MPa și 30 MPa, confirmând limitările mecanice asociate proceselor artisanale și industriale convenționale care nu asigură controlul riguros al parametrilor structurali, rezultând în prezența unor microfisuri și a unei porozități reziduale care scad rezistența globală, observații detaliate în Figura V.11 și Figura V.12. Aceste rezultate demonstrează că integrarea unor oxizi funcționali precum TiO_2 și utilizarea tratamentelor termice controlate pot transforma sticla reciclată într-un material cu performanțe mecanice net superioare, capabil să depășească considerabil mozaicurile convenționale atât din punct de vedere structural, cât și funcțional.

CAPITOLUL VI

REZISTENȚA TERMICĂ ALE STICLEI RECICLATE CONCASATE ȘI TRATATE TERMIC

6.1. Rezultatele analizei calorimetrice de scanare diferențială (DSC) a SRCT prin comparație cu Murano și Dynasty Smalti Glass Mosaic (DGM)

Studiul comportamentului termic al sticlei reprezintă o etapă fundamentală pentru înțelegerea stabilității structurale și pentru identificarea proceselor de tranziție ce pot afecta performanțele materialului în aplicații practice. Analiza a fost realizată utilizând metoda calorimetriei diferențiale de scanare (DSC), într-un domeniu larg de temperatură, cu scopul de a evidenția posibilele transformări asociate tranziției vitroase și stabilității termice.

Testele pentru determinarea calorimetrie diferențială prin scanare (DSC) au fost efectuate pe aceleași trei probe:

- Proba 1 – sticlă reciclată concasată și tratată termic (SRC_T)
- Proba 2 - Dynasty Smalti Glass Mosaic – China (DGM)
- Proba 3 – Murano – Italia

Probele au fost analizate în domeniul de temperatură 20–600 °C, cu o viteză de încălzire/răcire de 20 K/min, într-o atmosferă inertă de argon (Ar), pentru a preveni oxidarea sau alte reacții secundare. Acești parametri au fost selectați pentru a asigura reproductibilitatea rezultatelor și pentru a surprinde transformările termice caracteristice materialelor vitroase. Figura VI.1.

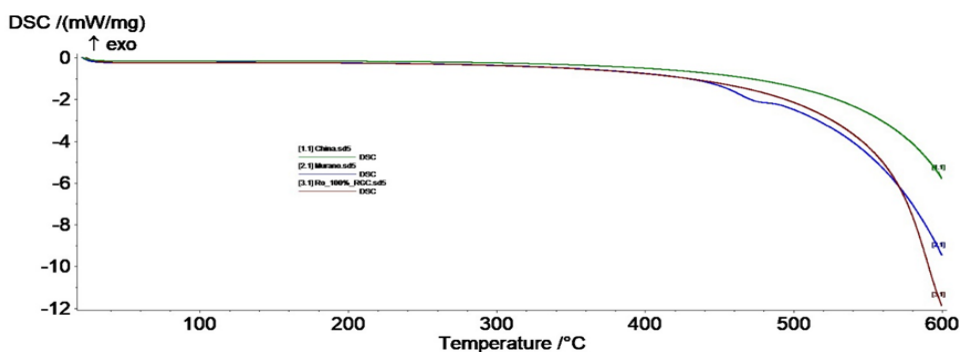


Figura VI.4. Graficul comparativ al analizei calorimetrice de scanare diferențială

CAPITOLUL VII

STUDIUL COMPARATIV ASUPRA REZISTENȚEI CHIMICE A STICLEI RECICLATE ȘI CONCASATE ÎN RAPORT CU STICLA DE MURANO ȘI MOZAICUL DGM-CHINA.

Pentru studiul comparativ al rezistenței chimice, am utilizat două soluții de HCl (acid clorhidric) și KOH (hidroxid de potasiu). Fiecare dintre acestea are proprietăți distincte și roluri cheie în diverse procese chimice, inclusiv tratarea materialelor, curățarea și sinteza chimică. HCl este un acid puternic, incolor sau ușor galben, cu un miros caracteristic. Se dizolvă complet în apă, formând o soluție acidă care este utilizată în numeroase aplicații industriale și de laborator. KOH este o bază puternică, solubilă în apă, care formează soluții alcaline. Este un compus ionic care conține ioni de potasiu (K^+) și ioni de hidroxid (OH^-). HCl și KOH sunt ambele substanțe chimice foarte reactive, dar au proprietăți opuse: HCl este un acid, iar KOH este o bază. În combinație, ele se pot neutraliza reciproc într-o reacție tipică de neutralizare, formând apă (H_2O) și sare (clorură de potasiu, KCl). Acest tip de reacție stă la baza multor procese chimice din industrie și laboratoare, inclusiv ajustarea pH-ului soluțiilor sau sinteza diverselor substanțe chimice.

HCl și KOH sunt importante pentru tratarea materialelor, inclusiv pentru studierea rezistenței materialelor precum sticla reciclată la deteriorarea chimică.

În ceea ce privește studiile privind sticla reciclată, HCl este frecvent utilizat pentru a analiza comportamentul chimic al sticlei și pentru a curăța suprafețele acesteia de impuritățile prezente. Pe de altă parte, KOH este utilizat în anumite procese de tratare chimică pentru a modifica.

Testarea rezistenței chimice a materialelor, în special împotriva soluțiilor acide și alcaline, este un parametru esențial pentru evaluarea durabilității acestora în medii agresive. În acest studiu, am analizat cât de bine sticla reciclată și tratată termic (SRC_T) poate rezista la deteriorarea provocată de soluții de acid clorhidric (HCl) la concentrații de 30% și 18% și soluții de hidroxid de potasiu (KOH) la 30 g/l și 100 g/l. Compararea rezultatelor obținute cu cele ale sticlei Murano și DGM-China (sticlă de calitate industrială din China) ajută la stabilirea performanței SRC_T în comparație cu materialele tradiționale.

Pentru a testa rezistența la substanțe chimice, probele SRC_T, Murano și DGM-China au fost plasate în soluții de HCl și KOH la concentrațiile specificate timp de 7 zile. Testele au fost efectuate la temperatura camerei, iar modificările structurale și compoziționale ale sticlelor au fost monitorizate prin analize vizuale și microscopice, dar și prin măsurarea modificărilor de greutate și a rezistenței mecanice Tabelele VII.1. -VII.4.

Tabelul VII.1. Soluția de HCl 3% pentru recipient – 7 zile

PROBE	Title 2	Title 3
MURANO	0,686 g	0,686 g
SRC_T	0,666 g	0,667 g
SRC_C	0,513 g	0,512 g
DGM-China	0,539 g	0,539 g

CAPITOLUL VIII

ANALIZA CHIMICĂ ȘI MORFOLOGICĂ A STICLEI RECICLATE ȘI TRATATE TERMIC ÎN COMPARAȚIE CU STICLA DE MURANO ȘI MOZAICUL DGM-CHINA.

Analiza chimică și morfologică a sticlei reciclate și tratate termic, realizată în comparație cu sticla de Murano și cu mozaicul DGM-China, evidențiază diferențe și asemănări relevante care confirmă potențialul materialului obținut prin reciclare. Investigațiile de compoziție chimică efectuate prin spectrometrie EDS au arătat că sticla reciclată tratată termic prezintă o compoziție apropiată de cea a materialelor de referință, având ca elemente principale SiO_2 , Na_2O , CaO și Al_2O_3 , cu variații ușoare generate de adaosurile de pigmenți sau oxizi utilizați în procesul de sinteză. În timp ce Murano și DGM-China păstrează compoziția clasică a materialelor vitroase decorative, sticla reciclată demonstrează că poate atinge aceleași proporții elementare, dar cu un avantaj major prin proveniența din deșeuri reutilizate, ceea ce îi conferă un caracter sustenabil. Din punct de vedere morfologic, examinările la microscopul electronic de baleiaj (SEM) au indicat că sticla reciclată tratată termic dezvoltă o microstructură compactă și uniformă, cu o distribuție omogenă a fazelor și cu o densitate redusă de defecte interne, aspecte care îi justifică performanțele mecanice ridicate. În contrast, probele de Murano și DGM-China prezintă microstructuri caracterizate prin prezența unor microcavități și incluziuni, rezultatul tehnologiilor tradiționale de prelucrare, ceea ce explică valorile mai scăzute ale rezistenței la compresiune și microduritate. Totodată, analiza morfologică a evidențiat faptul că tratamentul termic aplicat sticlei reciclate contribuie la reducerea porozității și la obținerea unei mase vitroase mai stabile, capabile să reziste mai bine atât la solicitări mecanice, cât și la agenți chimici agresivi. Comparativ, Murano și DGM-China își mențin relevanța prin tradiția estetică și prin calitatea artistică, însă din punct de vedere științific și funcțional, sticla reciclată tratată termic demonstrează avantaje semnificative, combinând o compoziție chimică compatibilă cu o morfologie optimizată. Această dublă analiză, chimică și morfologică, confirmă nu doar viabilitatea utilizării sticlei reciclate ca alternativă sustenabilă, ci și superioritatea sa în raport cu materialele consacrate, deschizând perspective pentru aplicarea pe scară largă în construcții, design arhitectural și industrii creative.

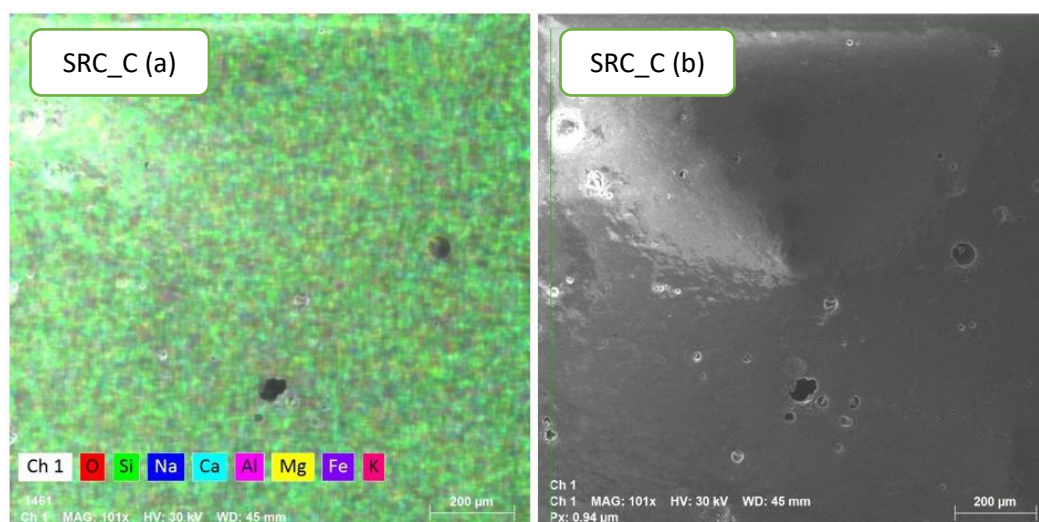


Figura VIII.1. Analiza chimică (a) și morfologică a sticlei SRC_C (b).

CAPITOLUL IX.

CONCLUZII. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

Gestionarea deșeurilor de sticlă reprezintă una dintre provocările majore ale societății contemporane, atât din perspectiva protecției mediului, cât și din punctul de vedere al resurselor naturale. Sticla, prin natura sa, este un material care nu se descompune natural în timp scurt și care ocupă volume considerabile în depozitele de deșeuri. În acest context, reciclarea sticlei nu mai este doar o opțiune tehnologică, ci o necesitate imperativă pentru atingerea obiectivelor de dezvoltare durabilă și pentru consolidarea principiilor economiei circulare.

Sticla reciclată joacă un rol din ce în ce mai important în industria modernă datorită beneficiilor ecologice și economice pe care le aduce. Recent, utilizarea sticlei reciclate a devenit o practică obișnuită în multe domenii, de la construcții și design interior până la producția de materiale de ambalare și produse decorative. Aceste aplicații se bazează pe avantajele semnificative ale reciclării sticlei, care contribuie la reducerea consumului de resurse naturale, la economisirea energiei și la reducerea emisiilor de carbon.

Cercetările întreprinse în cadrul acestei teze au urmărit să valorifice potențialul sticlei reciclate și concasate, supuse tratamentelor termice controlate, cu scopul de a obține materiale cu performanțe superioare atât mecanice, cât și chimice. Rezultatele obținute confirmă că sticla reciclată tratată termic (SRC_T) se poate constitui într-un material de referință pentru viitor, capabil să concureze și să depășească performanțele unor produse consacrate, precum mozaicul Murano sau mozaicul DGM-China.

9.1. Sinteza concluziilor experimentale

Studiul comparativ între sticla reciclată, sticla Murano și sticla DGM China a oferit o perspectivă detaliată asupra comportamentului mecanic și chimic al fiecărui tip de material, evidențiind atât avantajele, cât și limitările fiecăruia în diferite condiții de testare. Testele au fost efectuate pentru a evalua performanța acestora în termeni de compresie, microduritate și rezistență chimică, parametri esențiali pentru utilizarea lor în aplicații industriale și decorative.

În ceea ce privește rezistența la compresiune, sticla reciclată tratată termic (SRC_T) a demonstrat performanțe superioare, cu o rezistență mult mai mare decât sticla Murano și DGM China. SRC_T a atins valori de rezistență de până la 16 MPa, în timp ce Murano și DGM China au înregistrat valori semnificativ mai mici, de aproximativ 2,5 MPa și, respectiv, 3,5 MPa. Aceste diferențe evidențiază faptul că sticla reciclată tratată termic este mult mai potrivită pentru aplicații care implică solicitări mecanice intense, oferind o durabilitate mult mai mare în comparație cu sticla tradițională.

În ceea ce privește micro-duritatea, măsurată prin testul Vickers, sticla reciclată tratată termic a prezentat o duritate semnificativ mai mare în comparație cu Murano și DGM China. Testele de micro-duritate au arătat că SRC_T a atins valori de 555 HV, ceea ce indică o rezistență mult mai mare la abraziune și uzură, făcându-l un material excelent pentru utilizare în condiții exigente. În contrast, Murano și DGM China au înregistrat valori de micro-duritate mult mai mici, sticla Murano având o duritate de aproape 250 HV și DGM China 330 HV, indicând o performanță mai slabă în ceea ce privește rezistența la zgârieturi și deteriorări mecanice.

Testele de rezistență chimică au arătat rezultate similare pentru toate cele trei tipuri de sticlă - SRC_T, Murano și DGM-China - atunci când s-au utilizat soluții de HCl 30% și 18% și KOH 30 g/l și 100 g/l. Toate materialele testate au prezentat o rezistență comparabilă la agenții

chimici agresivi, fără diferențe semnificative în ceea ce privește comportamentul chimic sau modificările structurale. Aceste rezultate indică faptul că SRC_T, Murano și DGM-China au o rezistență chimică similară și se comportă la fel atunci când sunt expuse la acizi și baze puternice.

Rezultatele acestui studiu arată că sticla reciclată tratată termic (SRC_T) este foarte importantă pentru utilizări care necesită materiale rezistente și durabile, cum ar fi în construcții, automobile și realizarea de mozaicuri de lungă durată. În comparație, sticla Murano, care nu este la fel de rezistentă, este în continuare preferată pentru obiecte decorative și de lux, unde aspectul contează mai mult decât rezistența. În schimb, sticla Murano, cu rezistență mai mică, rămâne un material preferat în aplicații decorative și de lux, unde estetica joacă un rol mult mai important decât performanța mecanică. Sticla DGM China, deși mai durabilă decât Murano, nu se apropie de performanța SRC_T în ceea ce privește compresia și rezistența chimică.

În concluzie, sticla reciclată tratată termic (SRC_T) s-a dovedit a fi un material superior în ceea ce privește rezistența la compresiune, micro-duritatea și rezistența chimică în comparație cu sticla Murano și sticla DGM China. Aceste rezultate indică faptul că SRC_T este un material excelent pentru aplicații care necesită durabilitate și performanțe mecanice ridicate, în timp ce Murano și DGM China pot rămâne opțiuni potrivite pentru aplicații decorative, unde cerințele mecanice nu sunt atât de stricte. Cercetările viitoare ar putea explora alte modalități de îmbunătățire a performanței sticlei reciclate tratate termic, inclusiv prin combinații cu alte materiale, pentru a extinde domeniile de aplicabilitate și a crește durabilitatea și eficiența procesului de reciclare.

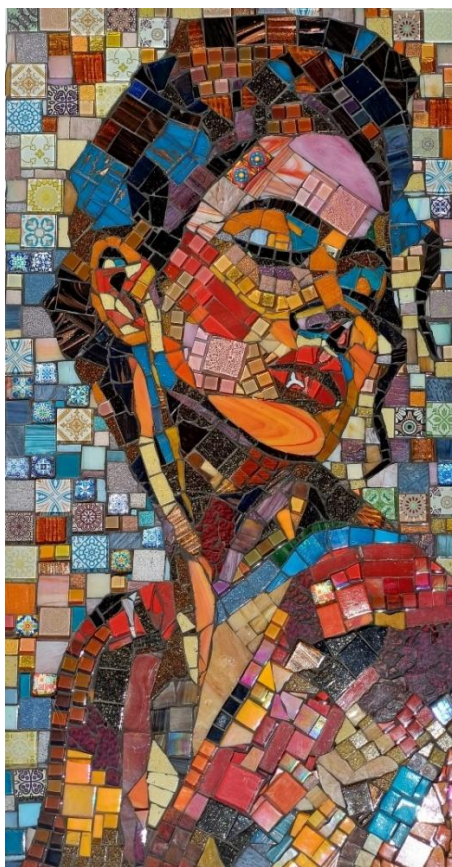


Figura IX.1. Tablou decorativ din mozaic.

Studiul s-a bazat pe un număr limitat de probe de sticlă reciclată, ceea ce poate limita generalizarea rezultatelor. Pentru a valida pe deplin concluziile, este necesar să se extindă

testarea la o gamă mai largă de compoziții și dimensiuni ale particulelor. Mozaicul Murano și DGM China pot prezenta variații semnificative în ceea ce privește compoziția și calitatea, în funcție de lotul de fabricație, tehnologia utilizată și originea materiei prime. Compararea cu un set limitat de probe din aceste categorii poate introduce un anumit grad de subiectivitate. Rezistența mecanică și chimică a sticlei reciclate a fost evaluată în laborator în condiții controlate. Performanța în medii reale (de exemplu, cicluri de îngheț-dezghet, expunere la raze UV, umiditate variabilă, trafic pietonal intens) necesită teste de durabilitate pe termen lung. Deși studiul s-a concentrat pe performanța tehnică, aspectul estetic și diversitatea cromatică – criterii esențiale în aplicațiile decorative – nu au fost analizate în detaliu, deși acestea influențează decizia de a utiliza materialul în proiectele de design. Deși procesul de zdrobire și tratare termică este fezabil la scară de laborator sau pilot, extinderea la scară industrială poate întâmpina provocări legate de controlul temperaturii, uniformitatea granulelor și costurile de producție în serie.