

Universitatea POLITEHNICA din București
Centrul Național de Micro și Nanomateriale (CNMN)

Raport științific intermediar

Etapa I

de desfășurare a proiectului „*Regenerarea materiilor prime (brute) și a produselor aflate la sfârșit de viață pentru a fi reutilizate în cimenturi/betoane (RECEMENT)*”
(cod ERANET-ERAMIN-RECEMENT, acronim RECEMENT)

București,
Decembrie 2019

1. Introducere

Având în vedere creșterea rapidă a urbanizării din zilele noastre, sustenabilitatea mediului reprezintă un factor important care nu poate fi trecut cu vederea de către ingineri, arhitecți, cercetători și, mai ales, de industria construcțiilor. O modalitate de a menține echilibrul în dezvoltarea durabilă poate fi utilizarea deșeurilor locale de unică folosință și / sau a materialelor reciclabile. Nivelul alarmant al producției de beton la nivel mondial, care implică o cantitate mare de resurse naturale, arată necesitatea sustenabilității prin utilizarea de materiale alternative. Se consideră că în producția de beton se consumă aproximativ 27 de miliarde de tone de materii prime, echivalentul a 4 tone per persoană în fiecare an. Procesele de exploatare și fabricație a unor cantități semnificative de agregate, de aproximativ 2,8 miliarde de tone de ciment anual, produc aproximativ 5-7% din emisiile totale de CO₂ ale planetei [1]. Studii recente preconizează că problema se va înrăutăți, deoarece se prevede că până în 2025 vor fi emise aproximativ 3,5 miliarde de tone de CO₂ în procesul de fabricație a cimentului. De asemenea, se estimează că până în 2050, producția de beton va ajunge de patru ori mai mare decât cea din 1990. Trebuie să se țină cont de faptul că principalii componenți din beton, în special lianții și agregatele, reprezintă aproximativ 10-15%, respectiv 60– 80% din volumul total al acestuia [1, 2].

Exploatarea din carieră la nivel mondial, care are ca obiectiv producerea de agregate groșiere, a modificat extrem de mult echilibrul ecologic. În consecință, este esențial să se găsească înlocuitori durabili care să furnizeze atât liantul, cât și agregatele utilizate în mod normal în industria betonului, pentru a reduce efectele adverse asupra mediului ca urmare a utilizării eextensive a materiilor prime naturale. Figura 1 prezintă cantitatea (în tone) de agregate produse pe cap de locuitor în diverse țări. Contrintuitiv, în prezent multe deșeuri sunt aruncate pe câmpuri deschise și rămase neutilizate. Un exemplu de astfel de deșeuri îl reprezintă deșeurile de construcții și provenite din demolări, care ar putea fi reciclabile și reprezintă un valoros agregat de beton reciclat (RA) [2, 3].

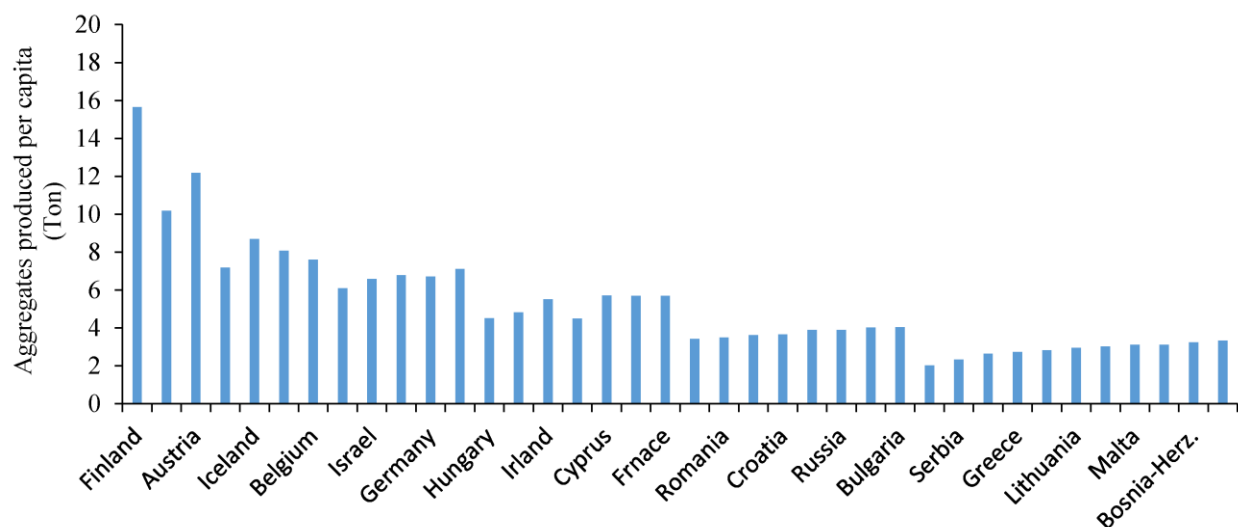


Figura 1. Producția de agregate (tone) per capita în țările europene [3].

Agregatele de beton reciclat (RA) se găsesc din abundență în numeroase țări dezvoltate și în curs de dezvoltare ca urmare a demolării clădirilor și structurilor vechi; în plus, în multe țări sfâșiate de război, numeroase clădiri au fost ținta bombardamentelor, iar structurile au devenit redundante. Acest lucru are ca rezultat cantități uriașe de RA cu rol important în dezvoltarea durabilă, ca o alternativă la agregatele primare (naturale). Cu toate acestea, multe studii au demonstrat că utilizarea RA în beton va afecta negativ proprietățile mecanice ale acestuia. Rezultatele din literatură au arătat că utilizarea betonului obținut 100% din RA este limitată, datorită reducerii rezistenței mecanice cu până la 15-25% [2].

În ciuda reducerii performanțelor mecanice și de durabilitate ale betonului obținut din RA [4], există o serie de materiale cimentoide tradiționale (SCMs) cu activitate pozzolanică ridicată care i-ar putea îmbunătăți considerabil proprietățile [5]. Multe subproduse industriale solide, cum ar fi materialele silicioase și aluminoase (cenușă zburătoare de termocentrală (FA) [6-9], silice ultrafină (SF) [10-12] și zgură granulată de furnal măcinată (GGBS) [2, 13-15]), precum și unele materiale pozzolanice naturale [16] (tuf vulcanic, diatomit etc.) pot fi considerate SCM deoarece prezintă proprietăți liante și / sau pozzolanice [17]. Datorită diversității acestor materiale și a variațiilor mari în ceea ce privește compoziția fizică și chimică a acestora, este necesară dezvoltarea unui design general pentru utilizarea lor în beton [18, 19].

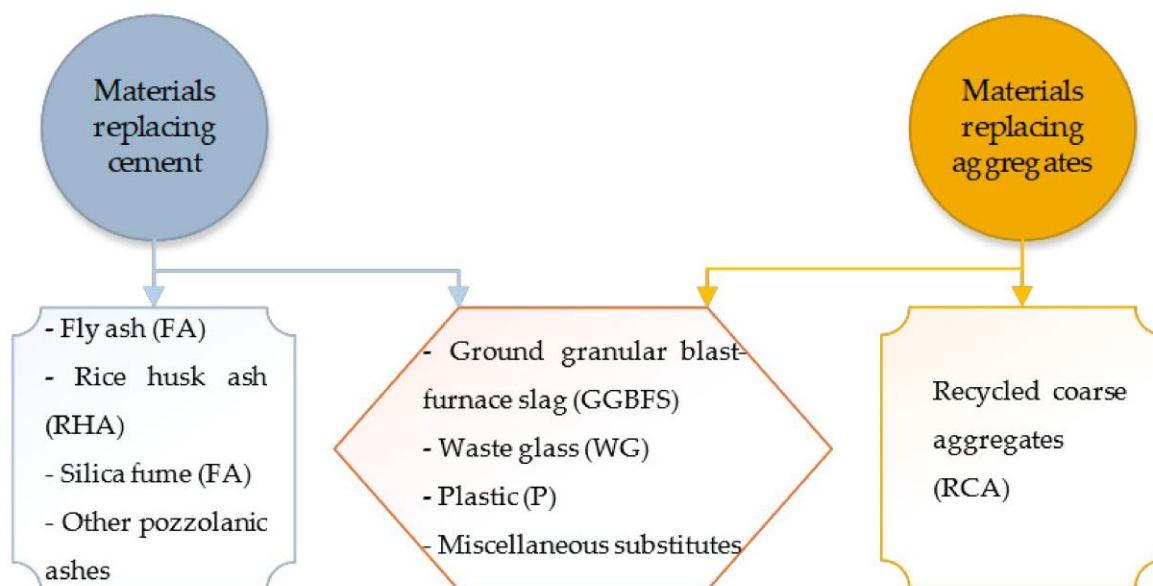


Figura 2. Materiale utilizate ca substituenți ai cimentului portland [20].

Utilizarea de materiale cimentioide suplimentare (SCMs) a devenit mai intensă în industria betonului datorită proprietăților mai bune pe termen lung ale produsului final [21]. Per ansamblu, SCMs pot reduce cantitatea de ciment necesară pentru producția de beton și cantitățile de subproduse industriale care sunt considerate materiale reziduale; astfel, betonul produs folosind până la 30% din SCM-uri ca înlocuitor pentru ciment ar putea fi considerat un beton mai ecologic [2, 5, 22]. Prin urmare, îngrijorările cu privire la disponibilitatea abundentă a SCM-uri tradiționale au condus la identificarea altor surse durabile de materiale pozzolanice [2, 5].

2. Materiale cementoide suplimentare

Materialele cementoide suplimentare (SCMs) sunt utilizate pe scară largă în producția de beton la nivel mondial. Termenul acoperă o gamă largă de materiale, incluzând pozzolane naturale (și fabricate) și subproduse industriale, cum ar fi cenușa zburătoare de termocentrală, zgură și silica ultrafină [23]. Deși proprietățile diferitelor tipuri de SCM-uri variază considerabil, ele au în comun capacitatea de a reacționa chimic în beton și de a produce compuși ce vin în completarea celor produși prin hidratarea cimentului portland [24]. Una dintre cele mai importante caracteristici ale SMC este pozzolanicitatea lor sau capacitatea de a reacționa cu hidroxidul de calciu (portlandit, CH) și de a forma silicați de calciu hidratați (C–S–H) [25].

Folosite corespunzător, SCM-urile pot îmbunătăți multe dintre proprietățile betonului proaspăt și întărit. Utilizarea SCM în beton nu este nouă, deoarece utilizarea pozzolanelor, cum ar fi cenușa vulcanică, a fost urmărită în civilizațiile grecești și romane antice, iar multe dintre structurile construite cu pozzolani încă există în prezent [24]. Cele mai utilizate SCMs în industria cimentului sunt discutate în cele ce urmează: cenușă de termocentrală (FA) și/sau cenușă de termocentrală ultrafină (UFFA) [26], silice ultrafină (SF) [27, 28] și materiale puzzolanice tradiționale precum cenușă de coajă de orez (RHA) [29-31], cenușă din melasă de trestie de zahăr sugarcane bagasse ash (SBA) [32-34], cenușă de nămol din ape epurate (SSA) [35, 36], cenușă din ulei de palmier ars (POFA) [37-40], steril minier [41-44], praf de marmură [45-49], reziduuri de la construcții și demolări (CDD) [50-52].

2.1. Silice ultrafină (SF)

Silicea ultrafină (SF) se încadrează în aceeași categorie cu produsele secundare rezultate din aplicații industriale. SF poate fi, de asemenea, găsită ca micro-silice, silice ultrafină condensată sau silice volatilizată. SF, un produs secundar al producției de siliciu metalic, este o pulbere fină care se ridică sub formă de vapori oxidați din cuptor în timpul procesului de fabricație a siliciu și care sunt condensați în final la răcire [5]. Silicea ultrafină constă aproape exclusiv din SiO_2 de dimensiuni foarte mici de particulă și o activitate pozzolanică relativ ridicată [53].

SF a fost folosită pentru prima dată în timpul revoluției industriale la mijlocul secolului XX în diferite țări pentru a reduce eliberarea materialului în atmosferă. De atunci au avut loc numeroase cercetări și diverse aplicații ale silicei ultrafine, în special în industria construcțiilor. În general, distribuția granulometrică a particulelor de SF trebuie să aibă o dimensiune medie de $0,1\ \mu\text{m}$, în care majoritatea particulelor ($> 95\%$) sunt mai mici de $1\ \mu\text{m}$. Caracteristica esențială a SF este finețea sa, acest lucru având un impact deosebit asupra performanței generale a betonului, atât pe termen scurt, cât și pe termen lung [20].

Există mai multe avantaje ale adăugării SF în beton. SF poate îmbunătăți capacitatea liantă dintre pasta de ciment și agregate, ca urmare a scăderii cantității de Ca(OH)_2 la interfața dintre componente prin adăugarea de SF. Suprafața specifică ridicată a SF permite ca mai multe particule de Ca(OH)_2 să reacționeze în prezența apei și are ca rezultat un proces de hidratare mai bun și o densitate mai mare în consecință [20].

Un studiu realizat de Seong Soo Kim *et al.* [54] a utilizat trei tipuri de agregate groiere (bazalt, cuarțit și granit) pentru a realiza epruvete de beton. Ca principal liant a fost utilizat

cimentul Portland obișnuit (OPC), în conformitate cu ASTM C150. Pentru studiu comparativ, a fost folosită SF pentru a înlocui cimentul în proporție de 10%. Cercetătorii au demonstrat că rezistența la compresie a crescut odată cu adăugarea de agregate groiere (adică granit și cuarțit). Pe de altă parte, adăugarea silicei ultrafină a dus la o rezistență la compresie sporită pentru epruvetele care conțin bazalt (vezi Figura 3).

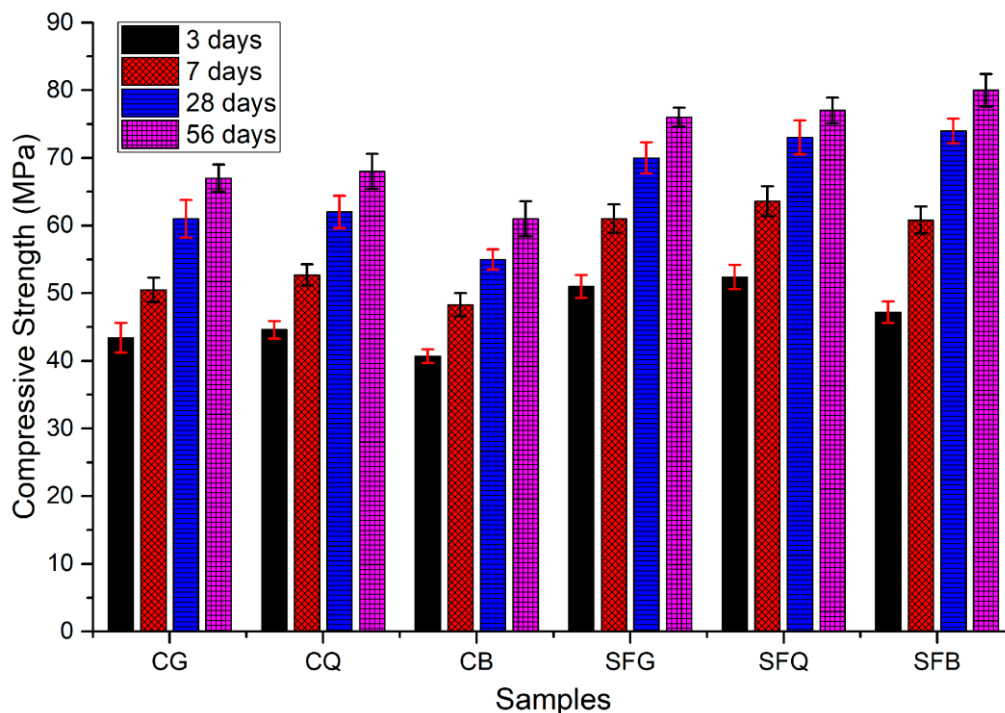


Figura 3. Rezistența mecanică la compresie (epruvetele ce conțin ciment sunt notate CG, CQ, respectivCB, epruvetele ce conțin silice ultrafină sunt notate FQ, and SFB) [54].

Tabel 1. Compoziție eprubetelor în procente masice [55].

Masa ingredientelor (kg/m ³)					
Series	Water	Cement	SF	Fine Aggregate	Aggregate
I	210.00	389.00	-	614	1141
II	210.00	340.80	48.20	614	1141
III	210.00	326.28	62.72	614	1141

Shijun Zhao a produs și testat 3 șarje de beton cu un conținut de 0%, 12% și 16% silice ultrafină ca înlocuitor al cimentului [55].

Rezultatele au arătat că introducerea SF în beton dă rezultate și performanțe mai bune din punct de vedere al proprietăților mecanice la tracțiune. Rezistența la tracțiune dinamică a

eșantioanelor crește odată cu creșterea vitezei de încovoiere datorită proprietăților fizice și mecanice excelente ale SF, iar comportamentul la deformare al betonului are o legătură semnificativă cu viteza de încordare (see Figura 4) [55].

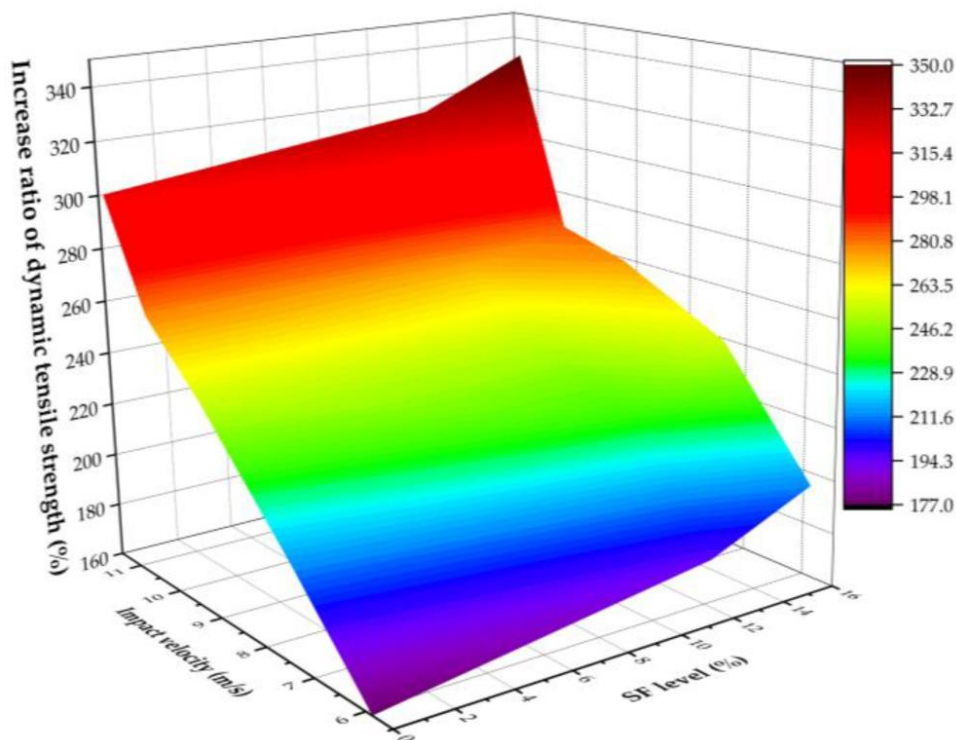


Figura 4. Dynamic tensile strength under different impact velocities and SF levels [55].

Împreună cu beneficiile economice și de mediu pe care înlocuirea cimentului Portland obișnuit (OPC) le are, utilizarea silicei ultrafină în beton oferă caracteristici speciale betonului, cum ar fi permeabilitate redusă, protecție îmbunătățită împotriva coroziunii pentru barele de oțel, rezistență crescută împotriva sulfaților și atacurilor chimice, rezistențe și performanțe mecanice îmbunătățite și niveluri ridicate de rezistență la tracțiune și încovoiere [56, 57].

2.2. Cenușă de termocentrală (FA) și cenușă de termocentrală ultrafină (UFFA)

FA, un produs secundar de la centrale electrice pe cărbune este o pulbere formată din particule fine care sunt eliminate din cazan împreună cu gazele de ardere [5].

Există diferite tipuri de cenușă zburătoare de termocentrală, inclusiv clasa N, clasa F și clasa C, generate de arderea cărbunelui negru și respectiv a cărbunelui brun. Clasele F și C sunt utilizate

pentru fabricarea materialelor de construcție precum beton, agregat ușor, cărămizi etc (vezi Tabel 2, Tabel 3 respectiv

Tabel 4) [20, 58]. Există diferite standarde care studiază și clasifică tipurile și proprietățile FA ca material suplimentar în beton. Societatea Americană de Testare și Materiale (ASTM) a dezvoltat prima versiune a standardelor pentru utilizarea FA (ASTM C 618) cu mai mult de 40 de ani în urmă [20].

Tabel 2. Tipuri de cenuși conform American Society for Testing and Materials [20, 58].

Type	Conținut de CaO [%]	Proprietăți
class C	≥ 10	cimentoide, pozzolanice, hidraulice
class F	≤ 10	pozzolanice
class N	Nu se utilizează în materialele de construcție comune	

Centralele electrice pe cărbune generează deșeuri solide considerabile care includ FA - până la 700 de milioane de tone pe an în întreaga lume - care pot fi utilizate în producția de ciment și beton datorită caracteristicilor sale pozzolanice. Aceasta permite reducerea necesarului brut de energie (GER), emisiilor de CO₂ (potențial de încălzire globală, GWP) și consumul de resurse naturale, deoarece FA poate înlocui parțial cimentul Portland în producția de beton și mortar [59, 60].

Tabel 3. Tipuri de cenuși conform S 3812-1981.

Type	Conținut SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ , [%]
Grade I	≥ 70
Grade II	≥ 50

Tabel 4. Tipuri de cenuși după comportarea termică.

Type	Short name	Forming temperature
Low temperature fly ash	LT	$\leq 900^{\circ}\text{C}$
High temperature fly ash	HT	$\leq 1000^{\circ}\text{C}$

Din nefericire, optimizarea compoziției betoanelor cu un volum mare de cenușă (HVFA) este destul de complexă datorită variației fineții, compoziției mineralogică și compoziției chimice (alcalii, sulfati, oxid de calciu și componente organice) ale FA [59].

Cantitatea de FA utilizată pentru înlocuirea cimentului în beton este limitată la 15-20% din masa totală a materialului cimentoid. Este acceptat faptul că, ca produs secundar al procesului industrial, utilizarea FA a făcut unele progrese în provocarea de a realiza construcții durabile. În plus, cenușa zburătoare are activitate pozzolanică, care este atribuită prezenței SiO₂ și Al₂O₃.

Aceștia reacționează cu hidroxidul de calciu în timpul hidratării cimentului, formând silicat de calciu hidratat (CSH) și aluminat de calciu hidratat (CAH), care sunt eficiente în formarea unor matrici mai dense, ceea ce duce la o rezistență mai mare și o durabilitate mai bună (vezi Figura 5) [61, 62].

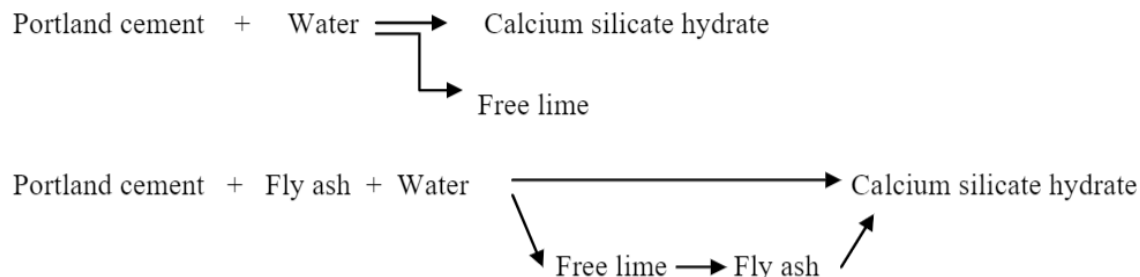


Figura 5. Reacții determinate de cenusă de termocentrală [58].

Ashish Kumer Saha [63] a evaluat utilizarea FA din clasa F ca o înlocuire parțială a liantului din beton. Au fost turnate în total cinci probe, dintre care un amestec de control fără FA și patru amestecuri cu un conținut de 10, 20, 30 și 40% FA ca înlocuitor pentru ciment. Raportul apă-ciment și volumul superplasticizantului au fost menținute constante pentru toate amestecurile. Rezistențele la compresiune (vezi Figura 6) ale eșantioanelor pe bază de FA au fost mai mici în primă fază comparativ cu proba control. Particulele de FA de dimensiuni mici, împreună cu o suprafață ridicată și o cantitate mare de conținut de silice amorfă în comparație cu cimentul Portland transmit reacția pozzolanică și, prin urmare, îmbunătățirea rezistenței pe o perioadă mai lungă.

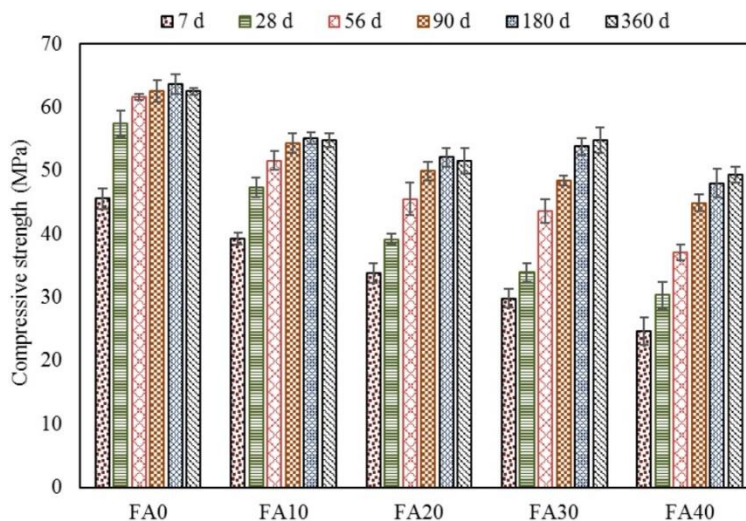


Figura 6. Rezistența mecanică la compresiune [63].

BingqianYan *et al.* [64] au studiat modificarea proprietăților mecanice ale mortarelor de ciment cu amestec de FA și var. Figura 7 a ilustrat că rezistența uniaxială la compresiune a mortarului de ciment cu un conținut de FA de 5% este cu 0,2 MPa mai mare decât cea a mortarului de ciment fără cenușă. Cu toate acestea, atunci când conținutul de FA a continuat să crească, rezistența uniaxială la compresiune a mortarului de ciment a arătat o tendință descrescătoare odată cu creșterea conținutului de cenușă. Analiza sugerează că motivul principal este acela că activitatea cenușii sub influența varului a fost limitată, iar utilizarea excesivă a cenușii a avut o anumită influență asupra creșterii rezistenței și a proprietăților liante ale cimentului [64].

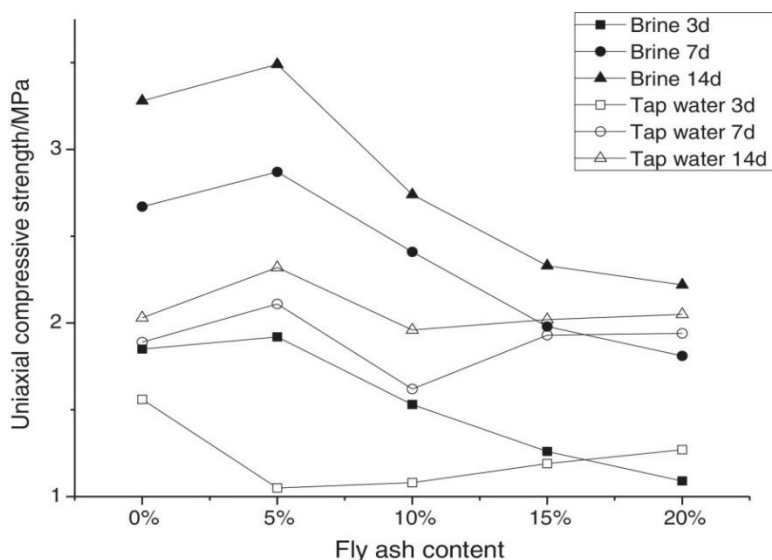


Figura 7. Rezistența mecanică la compresiune a unor probe ce conțin cenușă de termocentrală [64].

FA este un amestec de particule sferice constând atât din constituenți amorfi cât și cristalini, în principal pe bază de calciu, siliciu, aluminiu și oxizi de fier. Caracterul adecvat al FA pentru utilizarea la producerea diferitelor tipuri de ciment este determinat de caracteristicile sale fizice, chimice și compoziția mineralogică [65-67].

2.3. Alte cenuși pozzolanice

Cenușă de coajă de orez (**RHA**). Un produs secundar din agricultură care este folosit ca substitut de ciment în țările producătoare de orez este cenușa de coajă de orez [29]. Proprietățile cimentoide ale RHA nu au fost cunoscute în detaliu până la studiile experimentale din anii '70 [20]. RHA este reziduul de ardere al cojilor de orez, care sunt cochilii produse în timpul operației de decorticare a orezului. Fiecare tonă de orez nedecortecat produce aproximativ 200 kg de coajă,

care, la ardere, produce aproximativ 40 kg de cenușă. Plantele de orez absorb acidul ortosilicic din apele subterane, care este polimerizat pentru a forma silice amorfă în cojile boabelor [68]. După ardere, compușii organici sunt devolatizați sub formă de dioxid de carbon, în timp ce silicea este reținută în restul de cenușă. Studiile au arătat că principalul compus chimic din RHA este dioxidul de siliciu din biomasă (SiO_2), iar condițiile de prelucrare au un efect semnificativ asupra caracteristicilor silicei în RHA (a se vedea tabelul 6). Cenușa formată în timpul arderii în câmp deschis sau a combustiei necontrolate în cuptoare conține, în general, o proporție mare de minerale de silice cristaline mai puțin reactive, cum ar fi cristobalitul și tridimitul. Cea mai mare cantitate de silice amorfă este obținută atunci când RHA este ars între 500 și 700 °C [69]. Reactivitatea RHA este atribuită conținutului ridicat de silice amorfă și a suprafeței sale foarte mari, guvernată de structura poroasă a particulelor. În general, reactivitatea este favorizată și prin creșterea fineții cenușii. Ca material pozzolanic, RHA poate fi utilizat pentru a înlocui cimentul Portland cu până la 15%, RHA cu finețe ridicată putând îmbunătăți rezistența la compresiune și produce mortare cu porozitate scăzută. Pentru durabilitate, utilizarea RHA îmbunătățește semnificativ rezistența la permeabilitatea apei, penetrarea ionilor de clor și deteriorarea grupărilor sulfatice din beton [70]. Prezența RHA în beton ca substitut de ciment are beneficii și dezavantaje [30]. Rezistența la compresiune a betonului este unul dintre beneficiile vitale aduse de RHA. Cercetătorii au descoperit potențialul mare de înlocuire a cimentului cu RHA în procente mici [20].

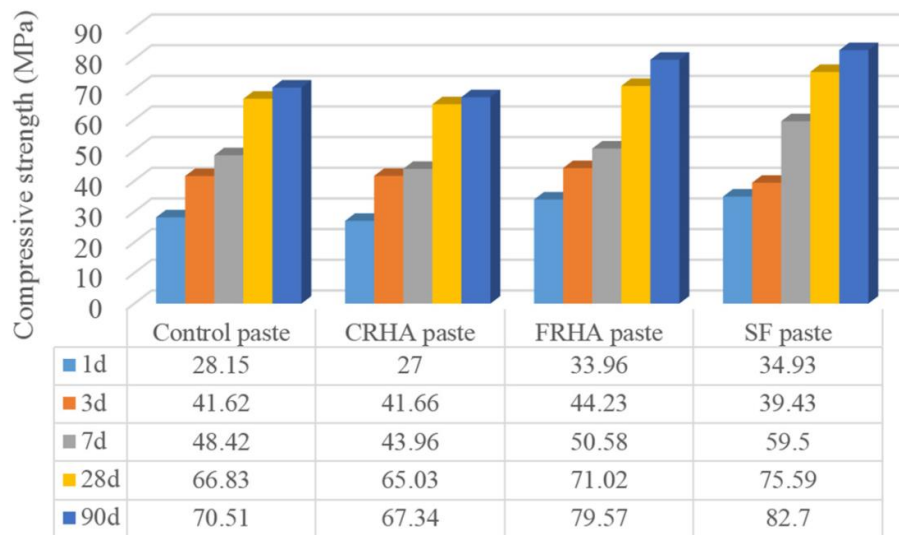
Tabel 5. Proprietățile chimice și fizice ale cenușii de coajă de orez [71].

Compoziție chimică*, [%]					
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O
93.4	0.05	0.06	0.31	0.35	1.4
Proprietăți fizice					
Finețe—dimensiune medie a granulei (μm)				8.6	
Gravitate specifică				2.05	
Index de activitate pozzolanică (%)				99	
Absorbția apei (%)				104	

* Compușii minoritari nu sunt prezentați

Weiting Xu *et al.* [70] au publicat un studiu care a evaluat comparativ efectul pozzolanic al silicei ultrafine (SF) și al cenușii de coajă de orez măcinată (RHA) ca materiale de cementoide suplimentare, asupra proprietăților pastelor și betoanelor amestecate din ciment (lucrabilitatea, proprietăți mecanice, durabilitatea și microstructura). Cimentul a fost parțial înlocuit cu SF și RHA

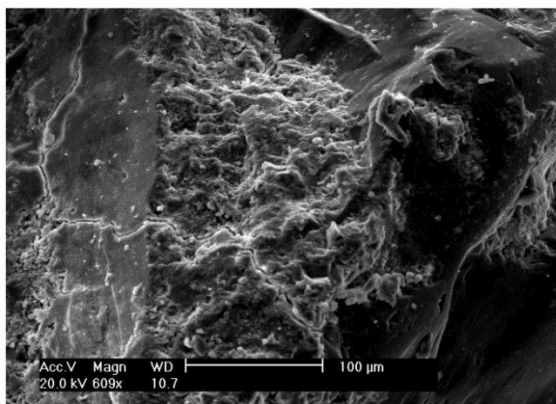
(fin măcinate) în proporții masice de 5%, 10%, 15%, 20%, 25% și 30%. Au ajuns la concluzia că nivelul optim de înlocuire a cimentului cu SF și RHA a fost de 10% din greutatea cimentului în paste și betoane și au testat rezistența la compresiune la această proporție (a se vedea figura 8). [70].



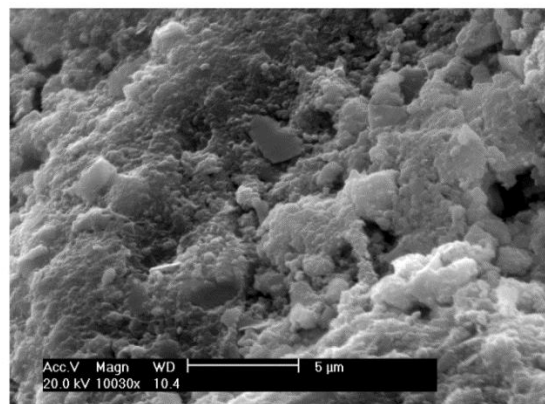
*Note: CRHA: RHA with 5 min grinding; and FRHA: RHA with 30 min grinding.

Figura 8. Rezistența mecanică la compresiune [70].

Se poate observa că pasta care încorporează RHA prezintă cea mai mică rezistență la compresiune la toți timpii de întărire testați, ceea ce se poate datora dimensiunii mai mari și suprafeței mai mici pentru particulele RHA grosiere. Rezultatele arată că adăugarea de RHA fin măcinată în pastă determină o creștere a rezistenței la compresiune în comparație cu betonul de control, datorită creșterii suprafeței specifice și a reactivității pozzolanice a RHA. De asemenea, diferențele morfologice pot fi responsabile pentru diferențele de rezistență la compresiune între exemplarele de beton (a se vedea figura 7 și figura 8) [70].



(a)



(b)

Figura 9. SEM pentru beton cu SF [70].

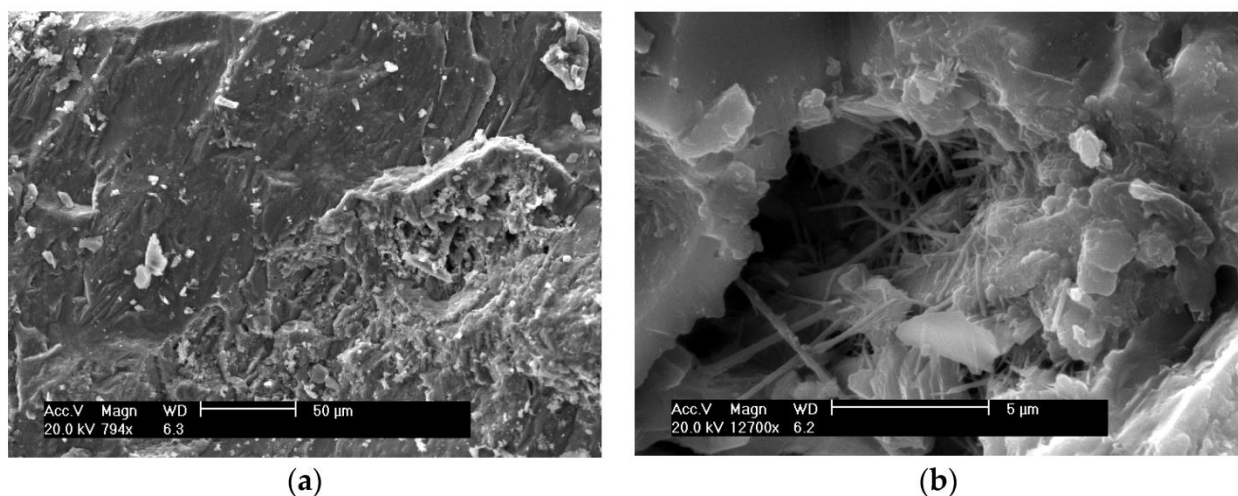


Figura 10. SEM pentru beton cu RHA [70].

Pe baza acestui studiu experimental [70], s-a constatat că RHA fin măcinat prezintă o reactivitate pozzolanică comparabilă cu SF și poate contribui la îmbunătățiri ale performanței sistemului cimentoid.

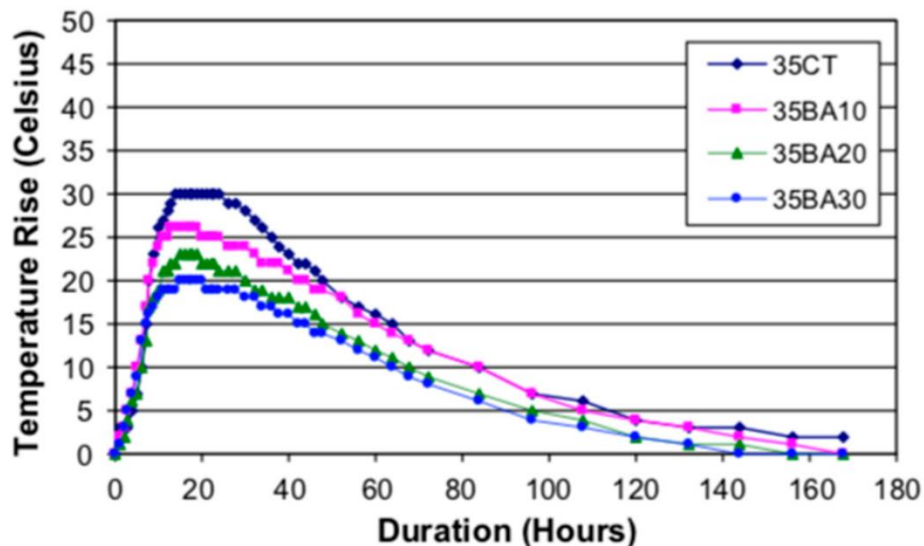
Cenușa din melasă de trestie de zahăr (**SBA**) este un produs secundar care rezultă din producția sucului de zahăr din trestia de zahăr, proces care necesită strivirea tulpinilor plantelor (a se vedea tabelul 7). Încorporarea SBA în beton reduce temperatura de hidratare cu până la 33% când 30% din OPC a fost înlocuit cu SBA [33]. În plus, permeabilitatea apei se reduce semnificativ în comparație cu probele de beton de control. Pentru a obține rezistențe la compresiune mai mari, înlocuirea cimentului variază de la 15%, 20% la 30%. S-a raportat că SBA ajută la controlul expansiunii în beton prin legarea fazelor alcaline [20].

Tabel 6. Proprietățile chimice și fizice ale SBA [71].

Compoziție chimică *, [%]					
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O
65.3	6.9	3.7	4.0	1.1	2.0
Proprietăți fizice					
Finețe—dimensiune medie a granulei (µm)				5.1	
Gravitate specifică				1.8	
Suprafața Blaine (m ² /kg)				900	

* Compușii minoritari nu sunt prezentați

Folosirea SBA ca înlocuitor parțial al cimentului determină o reducere a căldurii de hidratare în comparație cu betonul de referință. Reducerea creșterii temperaturii este proporțională cu procentul de înlocuire a SBA (a se vedea figura 11). Datorită unor astfel de proprietăți, SBA poate fi folosită pentru controlul temperaturii în masa betonului [71].



**a number at the end indicates the percentage of sugarcane bagasse ash*

Figura 11. Creșterea temperaturii semi-adiabatică a betonului care conține SBA [71].

Adaosul de SBA are efect pozitiv asupra durabilității betonului. Performanța durabilității betonului cu conținut diferit de SBA împotriva ionilor clorură, a penetrării gazelor și a apei (a se vedea figura 12) a fost de asemenea investigată de cercetători [32, 71].

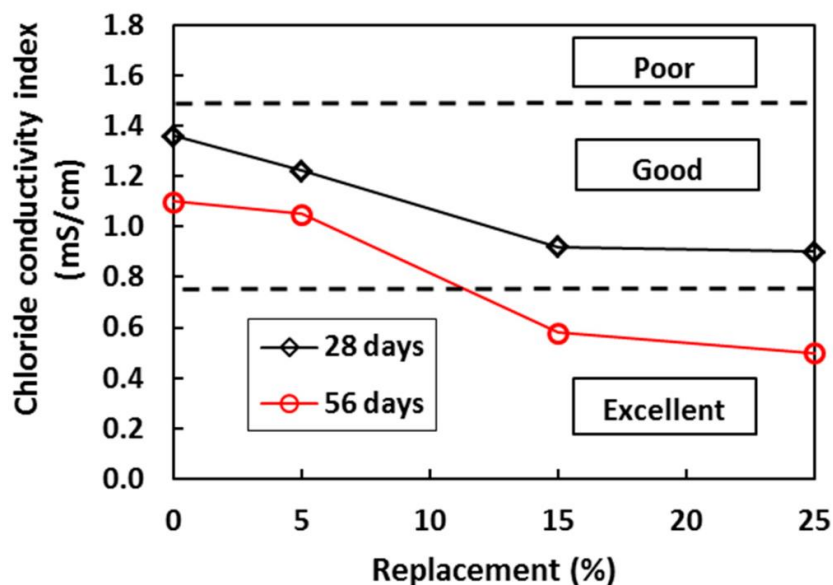


Figura 12. Efectul SBA asupra indicelui de conductivitate a clorurilor din beton [71].

Deșeurile din diferite surse au reprezentat subiecte de cercetare în ceea ce privește depozitarea deșeurilor, descompunerea și impactul acestora asupra mediului [72]. Cenușa de nămol din ape epurate (SSA) este un deșeu urban care poate fi folosit ca material cimentoid. Fiind un rezultat al tratării apelor uzate, există mai multe aplicații avantajoase care pot profita de aceste deșeuri. SSA este utilizat cu succes ca îngrășământ și este folosit și ca substitut de ciment [20, 73-75]. Cercetări ample au investigat posibilitățile de utilizare a SSA, nu numai ca material de adiție în ciment, ci într-o gamă largă de materiale de construcție, precum cărămizi, țiglă, pavele, agregate ușoare, dar și pentru substituirea cimentului din beton și mortar. Majoritatea studiilor efectuate, care au testat efectul SSA în mortar, au raportat că rezistența la compresiune scade, atunci când se utilizează SSA ca înlocuitor parțial al cimentului. În ciuda numeroaselor studii care investighează utilizarea SSA ca material de adiție în mortar și beton, cercetările nu au dus la aplicarea materialelor pe bază de ciment cu SSA în construcții. Acest lucru s-ar putea datora incertitudinii apartenenței SSA la grupul de pozzolani [76].

Cenușa din ulei de palmier ars (POFA) este o resursă financiară temeinică în mai multe țări tropicale, în special Malaezia și Indonezia [71]. Pentru fiecare 100 de tone de fructe proaspete prelucrate, vor exista aproximativ 20 de tone de coajă de nucă, 7 tone de fibre și 25 de tone de reziduuri evacuate din mori. POFA poate fi utilizat în beton, fie ca agregat, materiale de adiție în ciment sau ca material de umplere [77, 78]. Similar cu RHA și SBA, faza necristalină este, de asemenea, bogată în SiO_2 (~ 76%) și prezintă o reacție pozzolanică ridicată atunci când este utilizată ca liant pentru producerea betonului. Deși unele proprietăți ale betonului (în special rezistența și timpul de priză) sunt afectate negativ de POFA, cercetările au arătat că poate fi utilizat în multe aplicații [79, 80]. Ca atare, poate fi o resursă excelentă în țările în curs de dezvoltare. Cercetările viitoare au în vedere promovarea utilizării acestei resurse în aplicații structurale [71, 81, 82].

Deșeuri miniere. În ultimele decenii, capacitatea deșeurilor miniere a crescut enorm odată cu cererea de resurse minerale și metalice [83]. Deșeurile miniere sunt produse de industria extractilă și sunt în prezent unul dintre cele mai mari fluxuri de deșeuri din lume. Deșeurile din mine sunt măcinate fin în timpul prelucrării mineralelor și separarea mineralelor dorite [84]. Deoarece o parte considerabilă a proceselor de măcinare și separare utilizează ca mediu apa, steriele produse de întreprinderile miniere sunt de obicei evacuate sub formă de suspensii cu dimensiuni mici de particule, conținut ridicat de apă și debitabilitate, ceea ce duce la o stabilitate

mecanică deficitară [83]. Deșeurile miniere sunt depozitate fie în iazuri umede, alături de apa de proces sau sub formă de paste îngroșate în grămezi, de obicei în apropierea locurilor miniere [84]. Dacă deșeurile solide posedă o potențială activitate pozzolanică la temperatura camerei, aceasta permite reducerea consumului de ciment. În plus, este favorabil mediului înconjurător. Măcinarea mecanică, ca metodă de pretratare a deșeurilor solide, a fost utilizată pentru a îmbunătăți reactivitatea deșeurilor miniere; poate induce modificări ale proprietăților fizice și chimice ale particulelor, cum ar fi dimensiunea particulelor, structura cristalului și proprietățile suprafeței [84]. În prezent, principalele metode de tratament includ utilizarea lor ca reumplere în zonele subterane extinse și depozitarea în iazurile de decantare, considerate potențiale riscuri pe termen lung și cauze ale poluării mediului. Prelucrarea sterilului nu are legătură numai cu protecția mediului, ci este și în strânsă legătură cu beneficiile întreprinderii. În consecință, eliminarea și depozitarea sterilului au devenit centrul atenției la nivel mondial [83]. În ultimii ani, a fost raportată utilizarea sterilului de mină ca aditiv în prepararea materialelor de ciment; cu toate acestea, există o lipsă de literatură pe acest subiect.

Pulbere de marmură. Marmura este o rocă metamorfică fin cristalizată formată din granulele de calcit și derivă din metamorfismul de intensitate scăzută al rocilor calcaroase și dolomitice. Carbonatul de calciu (CaCO_3) poate reprezenta până la 99% din compoziția acestei roci carbonatate, care poate conține și MgO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 și Na_2O și, în proporții mai mici, K_2O , P_2O_5 , MnO , S, F, Cu, Pb și Zn [85]. Marmura a fost mult timp un important material de construcție. De exemplu, producția anuală din Turcia se apropie de 7 Mt și reprezintă 40% din depozitele globale (producția anuală totală de marmură în bloc a Turciei este de aproximativ 1.500.000 m^3 , producând aproape 375.000 m^3 pulbere de marmură anual [86]). În timpul proceselor de tăiere, modelare și lustruire, aproximativ 20% -25% din marmura fabricată este transformată în bulgări sau pulbere. Depozitarea prafului de marmură s-a transformat într-o problemă serioasă pentru mediu [87]. Pulberea de marmură (MP), care este un material inert obținut ca produs secundar industrial în timpul tăierii, modelării și lustruirii marmei, a fost de asemenea folosită cu succes ca adaos în SCC și SCM. Pulberea de marmură folosită ca material de adaos în ciment este cunoscută pentru a îmbunătăți unele proprietăți ale betonului autocompactabil proaspăt și întărit (SCC) [88]. În literatura de specialitate, există puține lucrări care vizează utilizarea pulberii de marmură în producțiile de beton sau mortar. Prin urmare, este necesară o perspectivă mai profundă a proprietăților betoanelor sau a mortarelor cu pulbere de marmură. În special, utilizarea combinată a pulberii de marmură în amestecurile cimentoide

ternare are nevoie de o atenție suplimentară pentru a elimina efectele sale negative asupra proprietăților proaspete ale betonului sau mortarului autocompactabil [86].

Resturile de construcții și demolări (CDD) reprezintă deșeuri solide generate în cantități mari de activitățile municipale și comerciale ale societății moderne [89]. De obicei, sunt sub formă de cărămizi, mortare, agregate, beton, sticlă, plăci ceramice, metale și materiale plastice. Acestea vor fi sortate mecanic în funcție de dimensiune și calitate și ulterior mărunțite la dimensiunea dorită, după necesități [90]. Studiarea materialelor de construcție din punct de vedere al ciclului de viață este esențial pentru o înțelegere de ansamblu asupra impactului durabil al proceselor asociate întregului ciclu de viață al clădirilor. Literatura conține lucrări care se concentrează asupra ciclului de viață al procesului materialelor de construcție pe baza studiilor de caz. Mai multe materiale de construcție sunt analizate din perspectiva ciclului de viață pentru a cuantifica impactul asupra mediului; de exemplu, betonul. Chiar dacă s-a efectuat o cantitate semnificativă de lucrări legate de evaluarea sustenabilității bazate pe LCA a materialelor de construcție și a clădirilor, literatura actuală nu conține un studiu cuprinzător privind reciclarea materialelor de construcție care ia în considerare atât aspectele legat de proces, cât și lanțul de aprovizionare în ansamblu [91]. Masa și eterogenitatea materialelor CDD care necesită managementul sfârșitului de viață (EOL) au descurajat eforturile de caracterizare la scară largă, dată fiind lipsa de coerență a datelor pe sistemele de urmărire nestandardizate [89].

3. Evaluarea ciclului de viață (LCA)

Evaluarea ciclului de viață (LCA) este o metodă de evaluare a tuturor impacturilor potențiale asupra mediului ale unui produs, proces sau activitate pe întregul său ciclu de viață [92].

S-au făcut studii de evaluare a ciclului de viață (LCA) despre sustenabilitatea betonului [93, 94]. Există o mare nevoie de încorporare a deșeurilor reciclate la începutul ciclului de viață, alături de necesitatea transformării deșeurilor generate la sfârșitul ciclului său de viață (a se vedea figura 13) în intrări pentru un alt sistem de producție sau chiar pentru sistem de producere a betonului [95-98].

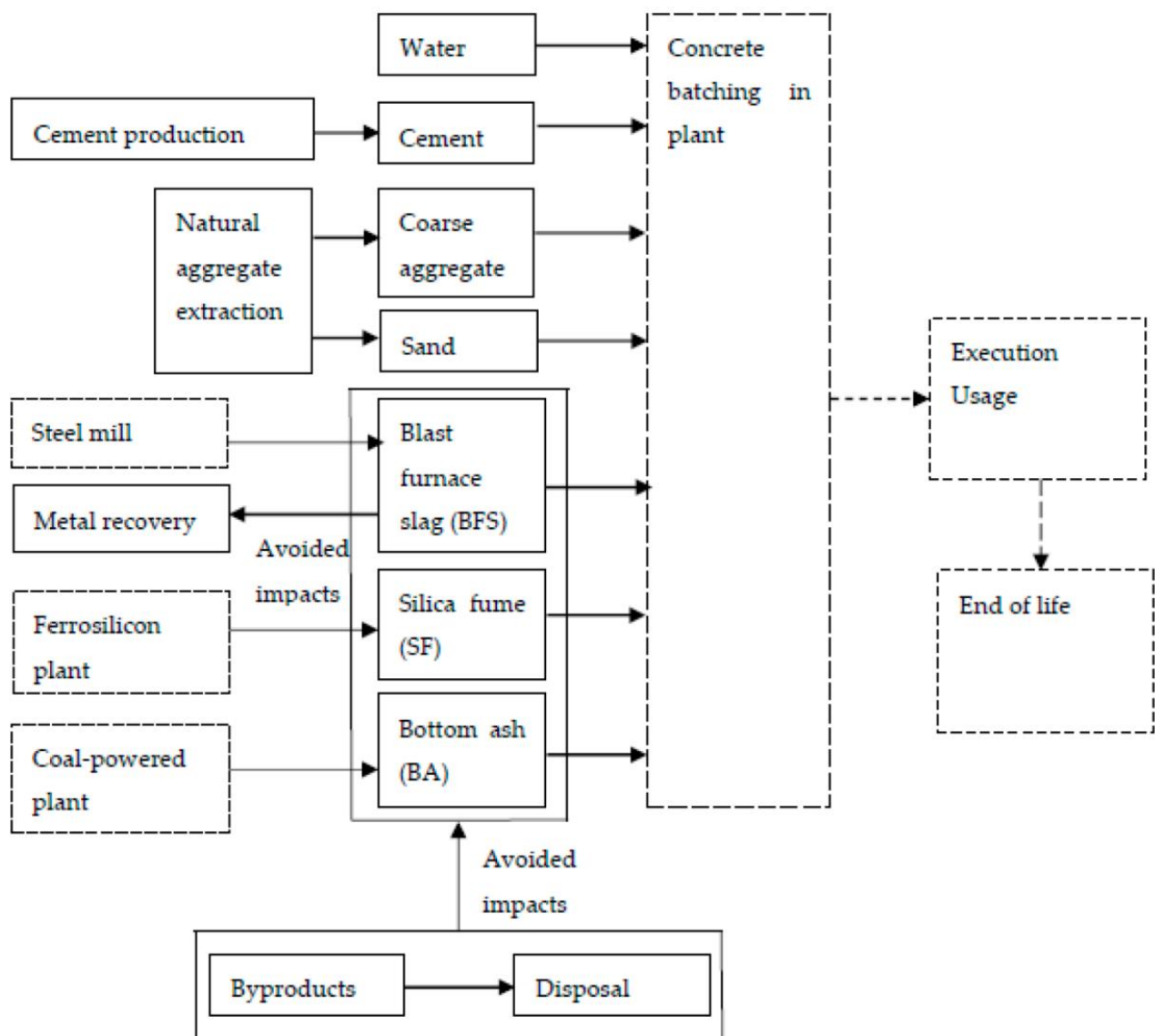


Figura 13. Evaluarea ciclului de viață (LCA): studiul procesului de producere a betoanelor (linie simplă - procese incluse; linie punctată - procese neincluse) [99].

Durabilitatea este o abordare pentru a găsi echilibrul în mediu prin integrarea resurselor economice și sociale disponibile și impunerea dezvoltării pe termen lung [20]. Această diferență a rezultatelor asupra mediului prin înlocuirea cimentului și a nisipului cu produse secundare poate fi explicată prin contribuțiile de mediu diferite de la ciment (74-93%) și nisip (0,3-2%) la evaluarea ciclului de viață total (LCA) a betoanelor pe bază de produs secundar. Contribuția mică a nisipului la evaluarea ecologică totală a betonului face ca această problemă să fie foarte sensibilă la diferiți factori legați de proiectarea betonului [99-101].

În ceea ce privește LCA-ul betonului, trebuie luate în considerare: (i) stadiul de proiectare, (ii) etapa de producție / execuție, (iii) stadiul de utilizare și (iv) etapa de sfârșit a vieții. Cu toate

acestea, betoanele structurale au diferite etape de utilizare pentru diferite elemente de construcție, precum grinzi, stâlpi și pereți. În special, diferitele elemente de construcție diferă în timpul vieții (50–300 de ani pentru elementele fundaționale și portante și 20–50 ani pentru pereții exteriori). Astfel, stadiul de utilizare este de obicei exclus din LCA-uri betonului. Mai mult, stadiul de sfârșit al vieții betonelor structurale este incert, deoarece este puternic influențat de practicile de eliminare aplicate [99, 102-104].

Este evidentă necesitatea unor studii suplimentare privind tratarea și reutilizarea deșeurilor de construcții pentru a preveni eliminarea acestora în mediu și pentru a le încorpora în ciclul de viață al betoanelor noi. Studiile indică o tendință de evaluare a utilizării deșeurilor, cum ar fi zgura, cenușa zburătoare și alte amestecuri minerale (cu mai puțin clincher și mai multe amestecuri minerale) pentru producția de beton, înlocuind o parte din cimentul Portland, deoarece cimentul este principalul factor responsabil pentru impactul asupra mediului cauzat de ciclul de viață al betonului [95, 105, 106].

În termeni economici, utilizarea materialelor alternative de tip deșeu implică reducerea costurilor construcției, oferind în același timp performanțe comparabile. Acest cost acoperă sursa și transportul materialului alternativ, procesul de ardere controlat și economiile derivate, cum ar fi gestionarea depozitelor. Ulterior, beneficiile pentru mediu vor reduce nevoile și cerințele uriașe de ciment Portland pe unitatea de volum de beton, precum și impactul asupra gamei enorme de deflație a emisiilor de GES [96, 107, 108].

4. Concluzii

Betonul este unul dintre cele mai utilizate materiale de construcție din lume. Totuși, producția de ciment Portland este un proces puternic consumator de energie și emite CO₂ în timpul procesului de calcinare, care are un efect crucial asupra încălzirii globale. În acest sens, se sugerează că trebuie depuse eforturi pentru găsirea betonului ecologic, cu performanțe ridicate în rezistență și durabilitate [27, 58, 109, 110].

SCM-urile sunt utilizate în mod obișnuit în amestecurile de beton ca înlocuitor a unei porțiuni de clincher în ciment sau ca înlocuire a unei porțiuni de ciment în beton. Această practică este favorabilă industriei, ducând în general la beton cu costuri mai mici, impact redus asupra mediului, rezistență mai mare pe termen lung și durabilitate îmbunătățită pe termen lung [25].

SF este un produs secundar al producției de siliciu și aliaj ferrosiliconic. Siliciul este un produs secundar în reducerea cuarțului de înaltă puritate cu cărbune, în cuptoarele cu arc electric. Componenta principală a silicei ultrafine este SiO₂, în procente mai mari de 90%. SF are particule sferice cu diametre medii de obicei între 0,03 μm și 0,1 μm, de aproximativ 100 de ori mai mici decât particulele de ciment. Suprafața sa specifică este de aproximativ 20.000 m² / kg, de 10 până la 20 de ori mai mare decât cea a altor materiale pozzolanice. Datorită caracteristicilor sale, silica ultrafină este un material pozzolanic extrem de reactiv [111]. Utilizarea acesteia poate îmbunătăți semnificativ proprietățile mecanice ale betonului, având în vedere umplerea benefică și efectele pozzolanice [112].

Utilizarea cenușii zburătoare în fabricarea materialelor de construcții a crescut semnificativ datorită disponibilității crescânde și a problemelor masive de mediu cauzate de eliminarea cenușii zburătoare. Două tipuri de cenușă zburătoare au fost definite drept clasa F și clasa C, în care este identificat un conținut ridicat de var. Proprietățile fizice ale cenușei zburătoare pot varia în funcție de natura cărbunelui; rangul, chimia și mineralogia materiilor minerale, proiectarea cuptorului, funcționarea cuptorului și metoda de control a particulelor, în timp ce proprietățile chimice sunt mai puțin dependente de acești factori. Cenușa zburătoare a fost încorporată în mai multe moduri diferite în fabricarea cărămizilor, betonului și a compozitelor de ciment, cum ar fi plăci, grinzi, coloane, panouri de perete, foi, țevi etc. În general, se recomandă utilizarea în jur de 25% din cenușa zburătoare ca înlocuire a cimentului pentru a obține produse finale eficiente. Cenușa zburătoare îmbunătățește durabilitatea, rezistența la îngheț / dezgheț, densitatea și pompabilitatea,

în timp ce reduce efectele nedorite, cum ar fi necesarul de apă, permeabilitatea și reacția alcaliilor / silice în beton [58].

În prezent, se poate considera că fezabilitatea utilizării deșeurilor agricole în beton a fost dovedită. Deși mai multe studii trebuie să se concentreze în special pe proprietățile pe termen lung, este nevoie, în primul rând, de progrese în tehnologia de producție și controlul calității acestor materiale. Numai atunci când cenușa de înaltă calitate poate fi produsă la costuri financiare și de mediu scăzute, utilizarea lor în practica inginerescă va deveni mai răspândită [71].

Noua abordare de evaluare a performanței tehnice a amestecurilor minerale alternative este evidentă, arătând că, pe lângă analiza proprietăților mecanice ale materialului, analiza ciclului său de viață este relevantă și va indica dacă acesta va fi viabil din punct de vedere ecologic pentru a fi utilizat la scara completă a ciclului de viață al betonului [95].

Director proiect,

CS III Dr.Ing. Bogdan Stefan Vasile Bogdan

5. Bibliografie

1. Madani, H., M.N. Norouzifar, and J. Rostami, *The synergistic effect of pumice and silica fume on the durability and mechanical characteristics of eco-friendly concrete*. Construction and Building Materials, 2018. **174**: p. 356-368.
2. Alnahhal, M.F., et al., *Evaluation of Industrial By-Products as Sustainable Pozzolanic Materials in Recycled Aggregate Concrete*. Sustainability, 2017. **9**(5): p. 767.
3. Nili, M., H. Sasanipour, and F. Aslani, *The Effect of Fine and Coarse Recycled Aggregates on Fresh and Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete*. Materials, 2019. **12**(7): p. 1120.
4. Hayles, M., L.F.M. Sanchez, and M. Noël, *Eco-efficient low cement recycled concrete aggregate mixtures for structural applications*. Construction and Building Materials, 2018. **169**: p. 724-732.
5. Solak, A.M., et al., *Effects of Multiple Supplementary Cementitious Materials on Workability and Segregation Resistance of Lightweight Aggregate Concrete*. Sustainability, 2018. **10**(11): p. 4304.
6. Gomaa, E., et al., *Bond strength of eco-friendly class C fly ash-based thermally cured alkali-activated concrete to portland cement concrete*. Journal of Cleaner Production, 2019. **235**: p. 404-416.
7. Yang, J., et al., *Eco-friendly treatment of low-calcium coal fly ash for high pozzolanic reactivity: A step towards waste utilization in sustainable building material*. Journal of Cleaner Production, 2019. **238**: p. 117962.
8. Mironyuk, I., et al., *Effect of surface-modified fly ash on compressive strength of cement mortar*. Materials Today: Proceedings, 2019.
9. Krishnaraj, L. and P.T. Ravichandran, *Investigation on grinding impact of fly ash particles and its characterization analysis in cement mortar composites*. Ain Shams Engineering Journal, 2019. **10**(2): p. 267-274.
10. Ávalos-Rendón, T.L., et al., *Synthesis of belite cements at low temperature from silica fume and natural commercial zeolite*. Materials Science and Engineering: B, 2018. **229**: p. 79-85.
11. Sasanipour, H., F. Aslani, and J. Taherinezhad, *Effect of silica fume on durability of self-compacting concrete made with waste recycled concrete aggregates*. Construction and Building Materials, 2019. **227**: p. 116598.
12. Meddah, M.S., et al., *Performances evaluation of binary concrete designed with silica fume and metakaolin*. Construction and Building Materials, 2018. **166**: p. 400-412.
13. C. Sekhar, D. and S. Nayak, *Utilization of granulated blast furnace slag and cement in the manufacture of compressed stabilized earth blocks*. Construction and Building Materials, 2018. **166**: p. 531-536.
14. Jaya prithika, A. and S.K. Sekar, *Mechanical and fracture characteristics of Eco-friendly concrete produced using coconut shell, ground granulated blast furnace slag and manufactured sand*. Construction and Building Materials, 2016. **103**: p. 1-7.
15. Sezen, C.B., et al., *Long-Term Outcomes of Chest Wall Resection in Non-Small Cell Lung Cancer in Geriatric Patients*. Haseki Tip Bulteni, 2018. **56**(4): p. 286.
16. Valipour, M., et al., *Comparing a natural pozzolan, zeolite, to metakaolin and silica fume in terms of their effect on the durability characteristics of concrete: A laboratory study*. Construction and Building Materials, 2013. **41**: p. 879-888.
17. Sánchez de Rojas Gómez, M.I. and M. Frías Rojas, *4 - Natural pozzolans in eco-efficient concrete*, in *Eco-Efficient Concrete*, F. Pacheco-Torgal, et al., Editors. 2013, Woodhead Publishing. p. 83-104.
18. Papadakis, V.G. and S. Tsimas, *Supplementary cementing materials in concrete: Part I: efficiency and design*. Cement and Concrete Research, 2002. **32**(10): p. 1525-1532.

19. Franco de Carvalho, J.M., et al., *More eco-efficient concrete: An approach on optimization in the production and use of waste-based supplementary cementing materials*. Construction and Building Materials, 2019. **206**: p. 397-409.
20. Al-Mansour, A., et al., *Green Concrete: By-Products Utilization and Advanced Approaches*. Sustainability, 2019. **11**(19): p. 5145.
21. Rahla, K.M., R. Mateus, and L. Bragança, *Comparative sustainability assessment of binary blended concretes using Supplementary Cementitious Materials (SCMs) and Ordinary Portland Cement (OPC)*. Journal of Cleaner Production, 2019. **220**: p. 445-459.
22. Samad, S. and A. Shah, *Role of binary cement including Supplementary Cementitious Material (SCM), in production of environmentally sustainable concrete: A critical review*. International Journal of Sustainable Built Environment, 2017. **6**(2): p. 663-674.
23. Seifi, S., et al., *Mechanical performance of a dry mortar without cement, based on paper fly ash and blast furnace slag*. Journal of Building Engineering, 2019. **22**: p. 113-121.
24. Thomas, M., *Supplementary cementing materials in concrete*. 2013: CRC press.
25. Juenger, M.C.G. and R. Siddique, *Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete*. Cement and Concrete Research, 2015. **78**: p. 71-80.
26. Reddy, M.V.S., K. Ashalatha, and K. Surendra, *Studies on eco-friendly concrete by partial replacement of cement with Alccofine and fine Fly Ash*. micron, 2006. **10**(d50): p. d90.
27. Garg, C. and A. Jain, *Green concrete: Efficient & eco-friendly construction materials*. International journal of research in engineering and technology, 2014. **2**(2): p. 259-264.
28. Kavitha, O., et al., *Microstructural studies on eco-friendly and durable Self-compacting concrete blended with metakaolin*. Applied Clay Science, 2016. **124**: p. 143-149.
29. Sathawane, S.H., V.S. Vairagade, and K.S. Kene, *Combine effect of rice husk ash and fly ash on concrete by 30% cement replacement*. Procedia Engineering, 2013. **51**: p. 35-44.
30. Zareei, S.A., et al., *Experimental evaluation of eco-friendly light weight concrete with optimal level of rice husk ash replacement*. Civil Engineering Journal, 2017. **3**(10): p. 972-986.
31. Hwang, C.-L. and T.-P. Huynh, *Investigation into the use of unground rice husk ash to produce eco-friendly construction bricks*. Construction and Building Materials, 2015. **93**: p. 335-341.
32. Zareei, S.A., F. Ameri, and N. Bahrami, *Microstructure, strength, and durability of eco-friendly concretes containing sugarcane bagasse ash*. Construction and Building Materials, 2018. **184**: p. 258-268.
33. Almeida, F.C.R., et al., *Use of sugarcane bagasse ash sand (SBAS) as corrosion retardant for reinforced Portland slag cement concrete*. Construction and Building Materials, 2019. **226**: p. 72-82.
34. Embong, R., et al., *Effectiveness of low-concentration acid and solar drying as pre-treatment features for producing pozzolanic sugarcane bagasse ash*. Journal of Cleaner Production, 2016. **112**: p. 953-962.
35. Zhou, Y.-f., et al., *Recycling incinerated sewage sludge ash (ISSA) as a cementitious binder by lime activation*. Journal of Cleaner Production, 2019: p. 118856.
36. Payá, J., et al., *5 - Sewage sludge ash*, in *New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete*, J. de Brito and F. Agrela, Editors. 2019, Woodhead Publishing. p. 121-152.
37. Wi, K., et al., *Use of an agricultural by-product, nano sized Palm Oil Fuel Ash as a supplementary cementitious material*. Construction and Building Materials, 2018. **183**: p. 139-149.
38. Alsubari, B., et al., *Properties of eco-friendly self-compacting concrete containing modified treated palm oil fuel ash*. Construction and Building Materials, 2018. **158**: p. 742-754.
39. Khankhaje, E., et al., *Sustainable clean pervious concrete pavement production incorporating palm oil fuel ash as cement replacement*. Journal of Cleaner Production, 2018. **172**: p. 1476-1485.

40. Alsubari, B., P. Shafigh, and M.Z. Jumaat, *Utilization of high-volume treated palm oil fuel ash to produce sustainable self-compacting concrete*. Journal of Cleaner Production, 2016. **137**: p. 982-996.
41. Pyo, S., et al., *Effects of quartz-based mine tailings on characteristics and leaching behavior of ultra-high performance concrete*. Construction and Building Materials, 2018. **166**: p. 110-117.
42. Kiventerä, J., et al., *Solidification/stabilization of gold mine tailings using calcium sulfoaluminate-belite cement*. Journal of Cleaner Production, 2019. **239**: p. 118008.
43. Lyu, X., et al., *Hydration kinetics and properties of cement blended with mechanically activated gold mine tailings*. Thermochimica Acta, 2020. **683**: p. 178457.
44. Ince, C., *Reusing gold-mine tailings in cement mortars: Mechanical properties and socio-economic developments for the Lefke-Xeros area of Cyprus*. Journal of Cleaner Production, 2019. **238**: p. 117871.
45. Taji, I., et al., *Application of statistical analysis to evaluate the corrosion resistance of steel rebars embedded in concrete with marble and granite waste dust*. Journal of Cleaner Production, 2019. **210**: p. 837-846.
46. Ghorbani, S., et al., *Improving corrosion resistance of steel rebars in concrete with marble and granite waste dust as partial cement replacement*. Construction and Building Materials, 2018. **185**: p. 110-119.
47. Aliabdo, A.A., A.E.M. Abd Elmoaty, and E.M. Auda, *Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete*. Construction and Building Materials, 2014. **50**: p. 28-41.
48. Topçu, İ.B., T. Bilir, and T. Uygunoğlu, *Effect of waste marble dust content as filler on properties of self-compacting concrete*. Construction and Building Materials, 2009. **23**(5): p. 1947-1953.
49. Li, L.G., et al., *Recycling of marble dust as paste replacement for improving strength, microstructure and eco-friendliness of mortar*. Journal of Cleaner Production, 2019. **210**: p. 55-65.
50. Cantero, B., et al., *Inclusion of construction and demolition waste as a coarse aggregate and a cement addition in structural concrete design*. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2019. **19**(4): p. 1338-1352.
51. Akhtar, A. and A.K. Sarmah, *Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective*. Journal of Cleaner Production, 2018. **186**: p. 262-281.
52. Silva, R.V., J. de Brito, and R.K. Dhir, *Use of recycled aggregates arising from construction and demolition waste in new construction applications*. Journal of Cleaner Production, 2019. **236**: p. 117629.
53. Lothenbach, B., K. Scrivener, and R.D. Hooton, *Supplementary cementitious materials*. Cement and Concrete Research, 2011. **41**(12): p. 1244-1256.
54. Kim, S.S., et al., *Influence of Coarse Aggregates and Silica Fume on the Mechanical Properties, Durability, and Microstructure of Concrete*. Materials, 2019. **12**(20): p. 3324.
55. Zhao, S. and Q. Zhang, *Effect of Silica Fume in Concrete on Mechanical Properties and Dynamic Behaviors under Impact Loading*. Materials, 2019. **12**(19): p. 3263.
56. Mansoor, J., et al., *Analysis of Mechanical Properties of Self Compacted Concrete by Partial Replacement of Cement with Industrial Wastes under Elevated Temperature*. Applied Sciences, 2018. **8**(3): p. 364.
57. Kwon, Y.-H., et al., *Intensified Pozzolanic Reaction on Kaolinite Clay-Based Mortar*. Applied Sciences, 2017. **7**(5): p. 522.
58. Gamage, N., K. Liyanage, and S. Fragomeni, *Overview of different type of fly ash and their use as a building and construction material*. 2011.
59. Coppola, L., D. Coffetti, and E. Crotti, *Plain and Ultrafine Fly Ashes Mortars for Environmentally Friendly Construction Materials*. Sustainability, 2018. **10**(3): p. 874.

60. Jones, M.R., A. McCarthy, and A.P.P.G. Booth, *Characteristics of the ultrafine component of fly ash*. Fuel, 2006. **85**(16): p. 2250-2259.
61. Supit, S.W.M., F.U.A. Shaikh, and P.K. Sarker, *Effect of ultrafine fly ash on mechanical properties of high volume fly ash mortar*. Construction and Building Materials, 2014. **51**: p. 278-286.
62. Shaikh, F.U.A. and S.W.M. Supit, *Compressive strength and durability properties of high volume fly ash (HVFA) concretes containing ultrafine fly ash (UFFA)*. Construction and Building Materials, 2015. **82**: p. 192-205.
63. Saha, A.K., *Effect of class F fly ash on the durability properties of concrete*. Sustainable Environment Research, 2018. **28**(1): p. 25-31.
64. Yan, B., et al., *Modification and in-place mechanical characteristics research on cement mortar with fly ash and lime compound admixture in high chlorine environment*. Journal of Materials Research and Technology, 2019. **8**(1): p. 1451-1460.
65. Rakhimova, N.R. and R.Z. Rakhimov, *Toward clean cement technologies: A review on alkali-activated fly-ash cements incorporated with supplementary materials*. Journal of Non-Crystalline Solids, 2019. **509**: p. 31-41.
66. El-Gamal, S. and F. Selim, *Utilization of some industrial wastes for eco-friendly cement production*. Sustainable Materials and Technologies, 2017. **12**: p. 9-17.
67. Palankar, N., A.R. Shankar, and B. Mithun, *Studies on eco-friendly concrete incorporating industrial waste as aggregates*. International Journal of Sustainable Built Environment, 2015. **4**(2): p. 378-390.
68. Talsania, S., J. Pitroda, and C.M. Vyas, *Effect of rice husk ash on properties of pervious concrete*. Int. J. Adv. Engg. Res. Studies/IV/II/Jan.-March, 2015. **296**: p. 299.
69. Krishna, R. and P.K.C. Admixtures, *Rice husk ash—an ideal admixture for concrete in aggressive environments*. Magnesium (as MgO), 2012. **1**(1.35): p. 0.35.
70. Xu, W., et al., *Pozzolanic Reactivity of Silica Fume and Ground Rice Husk Ash as Reactive Silica in a Cementitious System: A Comparative Study*. Materials, 2016. **9**(3): p. 146.
71. Chandra Paul, S., et al., *Agricultural Solid Waste as Source of Supplementary Cementitious Materials in Developing Countries*. Materials, 2019. **12**(7): p. 1112.
72. Rorat, A., et al., *8 - Sanitary and environmental aspects of sewage sludge management*, in *Industrial and Municipal Sludge*, M.N.V. Prasad, et al., Editors. 2019, Butterworth-Heinemann. p. 155-180.
73. Lynn, C.J., et al., *Sewage sludge ash characteristics and potential for use in concrete*. Construction and Building Materials, 2015. **98**: p. 767-779.
74. Cyr, M., M. Coutand, and P. Clastres, *Technological and environmental behavior of sewage sludge ash (SSA) in cement-based materials*. Cement and Concrete Research, 2007. **37**(8): p. 1278-1289.
75. Monzó, J., et al., *Reuse of sewage sludge ashes (SSA) in cement mixtures: the effect of SSA on the workability of cement mortars*. Waste Management, 2003. **23**(4): p. 373-381.
76. Kappel, A., L.M. Ottosen, and G.M. Kirkelund, *Colour, compressive strength and workability of mortars with an iron rich sewage sludge ash*. Construction and Building Materials, 2017. **157**: p. 1199-1205.
77. Mohammadhosseini, H., et al., *Enhanced performance for aggressive environments of green concrete composites reinforced with waste carpet fibers and palm oil fuel ash*. Journal of Cleaner Production, 2018. **185**: p. 252-265.
78. Bamaga, S., M. Hussin, and M.A. Ismail, *Palm oil fuel ash: promising supplementary cementing materials*. KSCE Journal of Civil Engineering, 2013. **17**(7): p. 1708-1713.
79. Raut, A.N. and C.P. Gomez, *Thermal and mechanical performance of oil palm fiber reinforced mortar utilizing palm oil fly ash as a complementary binder*. Construction and Building Materials, 2016. **126**: p. 476-483.

80. Awal, A.S.M.A., I.A. Shehu, and M. Ismail, *Effect of cooling regime on the residual performance of high-volume palm oil fuel ash concrete exposed to high temperatures*. Construction and Building Materials, 2015. **98**: p. 875-883.
81. Mohammadhosseini, H. and M.M. Tahir, *Durability performance of concrete incorporating waste metalized plastic fibres and palm oil fuel ash*. Construction and Building Materials, 2018. **180**: p. 92-102.
82. Tangchirapat, W., et al., *Use of waste ash from palm oil industry in concrete*. Waste Management, 2007. **27**(1): p. 81-88.
83. Yao, G., et al., *Effect of mechanical grinding on pozzolanic activity and hydration properties of siliceous gold ore tailings*. Journal of Cleaner Production, 2019. **217**: p. 12-21.
84. Kinnunen, P., et al., *Recycling mine tailings in chemically bonded ceramics – A review*. Journal of Cleaner Production, 2018. **174**: p. 634-649.
85. Ruiz-Sánchez, A., M. Sánchez-Polo, and M. Rozalen, *Waste marble dust: An interesting residue to produce cement*. Construction and Building Materials, 2019. **224**: p. 99-108.
86. Güneyisi, E., M. Gesoğlu, and E. Özbay, *Effects of marble powder and slag on the properties of self compacting mortars*. Materials and Structures, 2009. **42**(6): p. 813-826.
87. Aydin, E. and H.Ş. Arel, *High-volume marble substitution in cement-paste: Towards a better sustainability*. Journal of Cleaner Production, 2019. **237**: p. 117801.
88. Belaidi, A.S.E., et al., *Effect of natural pozzolana and marble powder on the properties of self-compacting concrete*. Construction and Building Materials, 2012. **31**: p. 251-257.
89. Townsend, T.G., et al., *CDDPath: A method for quantifying the loss and recovery of construction and demolition debris in the United States*. Waste Management, 2019. **84**: p. 302-309.
90. Prabhu, K.R., S.C. Yaragal, and K. Venkataramana, *IN PERSUIT OF ALTERNATIVE INGREDIENTS TO CEMENT CONCRETE CONSTRUCTION*.
91. Kucukvar, M., G. Egilmez, and O. Tatari, *Life Cycle Assessment and Optimization-Based Decision Analysis of Construction Waste Recycling for a LEED-Certified University Building*. Sustainability, 2016. **8**(1): p. 89.
92. Benbrahim, Z., et al., *Wait times for diagnosis and treatment of lung cancer: Experience of the medical oncology department of Hassan II University Hospital of Fez*. Global Journal on Quality and Safety in Healthcare, 2019. **2**(3): p. 65-69.
93. Wang, X.-Y., *Effect of Carbon Pricing on Optimal Mix Design of Sustainable High-Strength Concrete*. Sustainability, 2019. **11**(20): p. 5827.
94. Huntzinger, D.N. and T.D. Eatmon, *A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies*. Journal of Cleaner Production, 2009. **17**(7): p. 668-675.
95. Vieira, D.R., J.L. Calmon, and F.Z. Coelho, *Life cycle assessment (LCA) applied to the manufacturing of common and ecological concrete: A review*. Construction and Building Materials, 2016. **124**: p. 656-666.
96. Valderrama, C., et al., *Implementation of best available techniques in cement manufacturing: a life-cycle assessment study*. Journal of Cleaner Production, 2012. **25**: p. 60-67.
97. Feiz, R., et al., *Improving the CO2 performance of cement, part I: utilizing life-cycle assessment and key performance indicators to assess development within the cement industry*. Journal of Cleaner Production, 2015. **98**: p. 272-281.
98. Strazza, C., et al., *Resource productivity enhancement as means for promoting cleaner production: analysis of co-incineration in cement plants through a life cycle approach*. Journal of cleaner production, 2011. **19**(14): p. 1615-1621.
99. Pushkar, S., *The Effect of Additional Byproducts on the Environmental Impact of the Production Stage of Concretes Containing Bottom Ash Instead of Sand*. Sustainability, 2019. **11**(18): p. 5037.

100. Salas, D.A., et al., *Environmental impacts, life cycle assessment and potential improvement measures for cement production: a literature review*. Journal of Cleaner Production, 2016. **113**: p. 114-122.
101. García-Gusano, D., et al., *Life Cycle Assessment of applying CO₂ post-combustion capture to the Spanish cement production*. Journal of Cleaner Production, 2015. **104**: p. 328-338.
102. Chen, C., et al., *Environmental impact of cement production: detail of the different processes and cement plant variability evaluation*. Journal of Cleaner Production, 2010. **18**(5): p. 478-485.
103. Gursel, A.P., et al., *Life-cycle inventory analysis of concrete production: A critical review*. Cement and Concrete Composites, 2014. **51**: p. 38-48.
104. Josa, A., et al., *Comparative analysis of available life cycle inventories of cement in the EU*. Cement and Concrete Research, 2004. **34**(8): p. 1313-1320.
105. Sui, X., et al., *Exergetic life cycle assessment of cement production process with waste heat power generation*. Energy conversion and management, 2014. **88**: p. 684-692.
106. Song, D., et al., *Life-cycle environmental impact analysis of a typical cement production chain*. Applied energy, 2016. **164**: p. 916-923.
107. Aprianti S, E., *A huge number of artificial waste material can be supplementary cementitious material (SCM) for concrete production – a review part II*. Journal of Cleaner Production, 2017. **142**: p. 4178-4194.
108. Van den Heede, P. and N. De Belie, *Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and 'green'concretes: literature review and theoretical calculations*. Cement and Concrete Composites, 2012. **34**(4): p. 431-442.
109. Hasanbeigi, A., L. Price, and E. Lin, *Emerging energy-efficiency and CO₂ emission-reduction technologies for cement and concrete production: A technical review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012. **16**(8): p. 6220-6238.
110. Li, Z.G. *Development and Application of Eco-Friendly Concrete*. in *Advanced Materials Research*. 2011. Trans Tech Publ.
111. Pedro, D., J. de Brito, and L. Evangelista, *Evaluation of high-performance concrete with recycled aggregates: Use of densified silica fume as cement replacement*. Construction and Building Materials, 2017. **147**: p. 803-814.
112. Wu, Z., C. Shi, and K.H. Khayat, *Influence of silica fume content on microstructure development and bond to steel fiber in ultra-high strength cement-based materials (UHSC)*. Cement and Concrete Composites, 2016. **71**: p. 97-109.