

УДК 67.06 : 666.9.022.1

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.1/33>**Мельник Л.І.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Свідерський В.А.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Колобовнікова Є.А.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ГРАНУЛОМЕТРИЧНИЙ СКЛАД І КОНЦЕНТРАЦІЯ АНДЕЗИТУ ЯК ФАКТОРИ ВПЛИВУ НА ВЛАСТИВОСТІ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ

У статті досліджено вплив гранулометричного складу та концентрації відсівів андезиту на фізико-механічні властивості полімерних композитів на основі стирол-бутадієнової водної дисперсії марки Latex 2012. Композити з мінеральними наповнювачами активно застосовуються в промисловості завдяки можливості покращення міцності, зносостійкості та інших експлуатаційних характеристик. Одним із перспективних наповнювачів є андезит, який за рахунок своєї кристалічної структури та високої твердості може значно підвищити якість полімерних композитів. Однак оптимальні властивості композитів можуть бути досягнуті лише за умови правильного підбору фракційного складу та концентрації наповнювача.

У ході дослідження було використано три види андезитових фракцій: суміш фракцій (A_{nf}), крупнодисперсну монофракцію (A_{mz}) з частинками розміром 0,16–0,20 мм та тонкодисперсну фракцію (A_{md}) з частинками розміром менше 0,1 мм. Концентрація наповнювача варіювалася від 55 до 85 мас.%. Результати експерименту показали, що суміш фракцій андезиту при концентрації 85 мас.% забезпечує максимальні показники модуля пружності та зносостійкості композиту, що пояснюється рівномірним розподілом частинок різного розміру, що створює міцну міжфазну зону. Водночас, тонкодисперсна фракція в концентраціях 65 та 75 мас.% продемонструвала високу щільність та знижене водопоглинання, що є важливими факторами для забезпечення довговічності матеріалу.

Також встановлено, що з підвищенням концентрації андезиту загальна пористість композитів зменшується, що знижує їхню проникність для вологи та підвищує стійкість до зовнішніх факторів. Відкрита пористість та водопоглинання виявилися найнижчими у зразків з тонкодисперсним наповнювачем, що свідчить про більш щільну структуру композиту. Показники стирання також залишаються на низькому рівні при високих концентраціях андезиту, що забезпечує довговічність композиту в умовах механічного тертя.

Таким чином, дослідження підтвердило, що використання андезиту як наповнювача дозволяє значно покращити експлуатаційні властивості полімерних композитів. Вибір оптимального фракційного складу та концентрації наповнювача забезпечує високу міцність, низьку пористість і стійкість до зносу, що робить такі матеріали перспективними для застосування в будівництві, машинобудуванні та інших галузях промисловості.

Ключові слова: композит, наповнювач, андезит, латекс, гранулометричний склад, модуль пружності, концентрація, пористість.

Постановка проблеми. Забезпечення довговічності та економічності композиційних матеріалів, які використовуються у різних галузях промисловості, значною мірою залежить від властивостей їх компонентів, і, в першу чергу, від властивостей наповнювача, якщо мова йде про високонцентровані системи. Вибір відповідного наповнювача здатний суттєво покращити механічні характеристики

композиту, такі як зносостійкість, міцність та стійкість до стирання. Одним із перспективних матеріалів для використання як наповнювачі полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) є андезит – магматична порода, що відзначається високою міцністю, доступністю та сприятливим хімічним складом. В даному дослідженні мова йде не про сам андезит, а про відходи його виробництва у формі відсівів.

З літературних джерел [1, 2] відомо, що ефективність таких композитів значною мірою залежить від форми часток, гранулометричного складу та концентрації наповнювача. Однак вплив цих параметрів на пористість, щільність, модуль пружності та абразивну стійкість композиту з андезитом недостатньо вивчений, що ускладнює оптимізацію для конкретних умов експлуатації. Таким чином, існує необхідність у дослідженні впливу гранулометрії та концентрації відсівів андезиту як наповнювача на властивості полімерного композиту, щоб забезпечити більш ефективне його використання в промислових умовах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних дослідженнях полімерні композити з мінеральними наповнювачами знаходять широке застосування в промисловості завдяки їх високій міцності, зносостійкості та довговічності. Одним із перспективних напрямків є застосування полімербетонів з різними типами мінеральних наповнювачів, що покращують механічні та фізико-хімічні властивості композитів.

Зокрема, експериментальна робота [3] демонструє ефективність часткової заміни цементу на андезитовий пил у цементних композитах. Встановлено, що при заміщенні до 15% цементу відходами андезиту, композити демонструють покращені показники міцності та знижене водопоглинання завдяки зменшенню щільності порової структури. При вищих рівнях заміщення, таких як 30%, спостерігається значне збільшення здатності до деформації при вигині та розтягуванні, що підкреслює потенціал андезиту для підвищення еластичності матеріалу.

В роботі [4] досліджували можливість заміни традиційного керамічного шамоту на андезитові відсіву у виробництві пористої кераміки. У роботі зазначено, що андезит як магматична порода має хімічний і мінералогічний склад, який забезпечує високу стійкість до впливу високих температур і добру міцність при використанні його як наповнювача для керамічних виробів. Застосування андезитових відсівів дозволяє зменшити загальні витрати енергії у виробництві, оскільки їх використання замість шамоту знижує температуру випалу кераміки. Важливим є те, що кераміка на основі андезиту має високу відсоткову частку відкритих пор, що робить її перспективною для застосування в системах фільтрації та очищення.

У роботі [5] дослідження зосереджується на використанні геополімерних розчинів, виготовлених із відходів андезитового пилу (WAD), як альтернативного будівельного матеріалу, що може

замінити портландцемент і знизити викиди CO_2 , пов'язані з його виробництвом. Геополімери створювали шляхом активації WAD за допомогою силікату натрію та визначення оптимальної концентрації Na_2O (6%, 8% і 10%) у поєднанні з термічним затвердінням при різних температурах (60°C, 75°C і 90°C) і тривалостях (8 годин і 24 години). Показники міцності на вигин (f_s) і стиск (f_c) оцінювали на 1, 28 і 56 день, досліджуючи також вплив високих температур і різних режимів охолодження на властивості міцності та мікроструктуру матеріалів. Геополімери на основі WAD показали значне зниження міцності при водяному охолодженні, що обґрунтовується збільшенням мікротріщин.

Постановка завдання. Видобуток андезиту супроводжується утворенням великої кількості відсіву (10–30% від обсягу видобутої породи), що призводить до негативного впливу на екосистеми. Відсіву андезиту, які накопичуються на місцях видобутку, займають великі площі, це, в свою чергу, потребує розробки ефективних методів утилізації таких відходів. Водночас відомо, що андезит володіє значними фізико-механічними властивостями, які можуть бути корисними при використанні цих відсівів як наповнювача для полімерних композитів, зокрема для підвищення їхньої міцності, жорсткості, термічної та хімічної стійкості. Таким чином, використання відсівів андезиту як наповнювача не тільки сприяє вирішенню проблеми накопичення відходів, але й надає можливість створення матеріалів із покращеними експлуатаційними характеристиками для широкого спектра застосувань.

Метою цього дослідження є обґрунтування можливості та доцільності використання відходів андезиту як ефективного наповнювача для створення висококонцентрованих полімерних композитів із покращеними експлуатаційними характеристиками. Дослідження спрямоване на оцінку фізико-механічних властивостей відсіву андезиту та визначення його придатності для використання в полімерних композитах. Особлива увага приділяється аналізу впливу гранулометричного складу відсівів андезиту на механічні властивості полімерних композитів, оскільки розмір і форма частинок можуть істотно впливати на властивості кінцевого матеріалу.

Виклад основного матеріалу. Об'єктом цього дослідження є композиційні матеріали на основі системи андезит–сополімер з підвищеною концентрацією наповнювача, що змінюється в межах 55–85 мас.%. Дослідження включають застосування комплексу фізико-хімічних методів для аналізу анде-

зитових відсівів і композитів на їх основі. Гранулометричний склад визначався методами ситового аналізу, та досліджували за допомогою скануючого електронного мікроскопа JSM. Абразивну стійкість тестували відповідно до ДСТУ Б.В.2.7-212:2009 за допомогою круга Беме, а модуль пружності при стиску визначали відповідно до методики [6].

Процес виготовлення композиту передбачав використання водної стирол-бутадієнової дисперсії марки Latex 2012 як матриці та відсівів андезиту з Хустського кар'єру Закарпаття як наповнювача. Детальний опис хімічного та мінералогічного складу поверхні наповнювача, а також властивостей зв'язуючого представлено в попередніх роботах [7, 8, 9, 10, 11].

Також комплексний ІЧ-аналіз [11], ДТА-ТГ-аналізи, а також характеристика порової структури представлені в наших поданих роботах.

Коротко узагальнюючи попередні дослідження слід відмітити, що відсів андезиту, що використані у цьому дослідженні, характеризуються високим вмістом SiO_2 , при цьому співвідношення $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$ становить 3,5. Відсів має розвинену питому поверхню, яка становить $11,91 \text{ м}^2/\text{г}$ (за даними методу БЕТ). ТГ-аналіз показав втрату маси на рівні 4,2% у діапазоні температур $200\text{--}650^\circ\text{C}$, що вказує на виділення зв'язаної води.

Гранулометричний склад та морфологія частинок андезиту мають важливе значення для рівномірного розподілу в полімерній матриці, що впливає на технологічні та експлуатаційні характеристики композитів. Гранулометричний та електронно-мікроскопічний аналіз показав, що частинки мають бімодальний розподіл за розмірами: близько 5% частинок менше 63 мкм, тоді як понад 40% – більше 630 мкм (рис. 1).

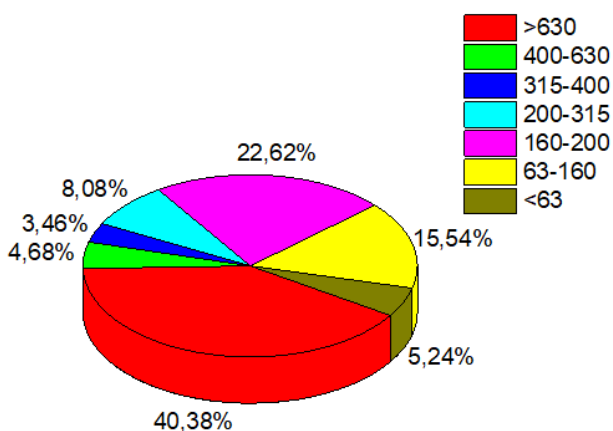


Рис. 1. Гранулометричний склад досліджуваного зразку відсівів андезиту (після попередньої подрібнення)

Частинки відсівів андезиту, зазвичай, мають нерегулярну та кристалічну форму, що надає їм механічні переваги в полімерних композитах. Завдяки нерівній і шорсткій поверхні вони ефективно взаємодіють з полімерною матрицею, підвищуючи адгезію між наповнювачем і зв'язуючим. Це призводить до підвищення механічної міцності композиту, оскільки нерегулярна форма частинок забезпечує краще механічне зчеплення. Особливо значущим є те, що приблизно 40% частинок мають розмір понад 630 мкм, що робить їх оптимальними для створення жорстких і стійких до навантажень композитів.

Дані електронної мікроскопії (рис. 2) підтверджують, що частинки відсіву андезиту мають нерівну, сколчасту форму, а їхні розміри узгоджуються з результатами гранулометричного аналізу. Крім того, спостерігається певна кількість частинок, близьких до нанорозмірів.

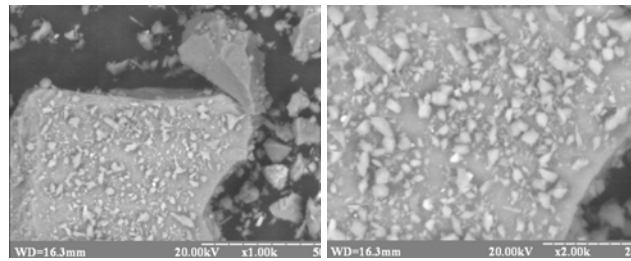


Рис. 2. Електронна мікроскопія зразку відсівів андезиту

Розмір, форма і розподіл частинок наповнювача впливають на рівномірність їх розподілу в полімерній матриці, що, в свою чергу, визначає такі властивості композиту, як структурна цілісність, щільність, пористість і стійкість до зовнішніх навантажень. Менші та більш рівномірно розподілені частинки, як правило, збільшують площу поверхні, що контактує з матрицею, тим самим забезпечуючи міцніший зв'язок між наповнювачем і полімером. Це сприяє підвищенню механічної міцності і зменшенню пористості композиту.

У цьому дослідженні вивчено композитні системи сополімеру Latex 2012 – відсів андезиту, при варіації гранулометричного складу андезиту як наповнювача. Досліджувані зразки включали поліфракційний андезит ($A_{\text{пф}}$), а також спеціально підібрані за розміром часток проби: монофракційну ($A_{\text{мф}}$) з крупнодисперсними частинками розміром $0,16\text{--}0,20 \text{ мм}$ і тонкодисперсну ($A_{\text{тд}}$) з частинками розміром менше $0,1 \text{ мм}$.

Проводили дослідження впливу концентрації наповнювача та його гранулометричного складу на модуль пружності розроблених композитів (рис. 3).

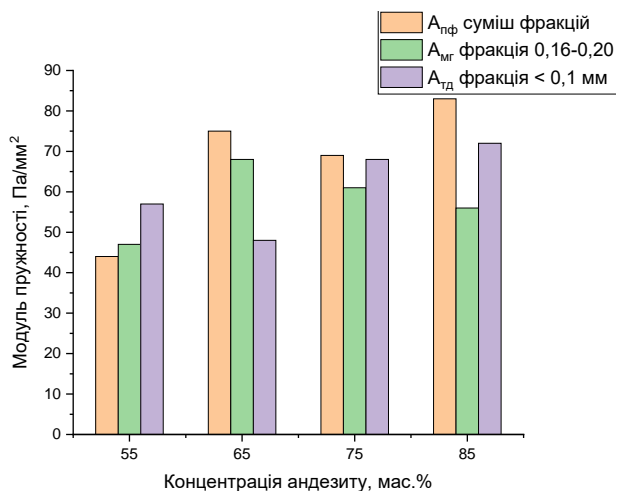


Рис. 3. Модуль пружності композитів залежно від концентрації андезиту для різних гранулометричних складів

Аналіз отриманих даних демонструє, що із збільшенням концентрації андезиту від 55% до 85% спостерігається зміна модуля пружності композитів, причому ступінь впливу залежить від розміру частинок наповнювача.

Отже, на основі аналізу (рис. 3) можна зробити висновок, що суміш фракцій андезиту ($A_{\text{суміш фракцій}}$) при високій концентрації (85%) є найбільш ефективною для досягнення максимального модуля пружності в композитах. Водночас тонкодисперсна фракція ($A_{\text{тд}}$) забезпечує високу міцність при середніх концентраціях (65% та 75%). Крупнодисперсна монофракція ($A_{\text{мг}}$) виявляється менш ефективною у порівнянні з іншими фракціями, що може бути пов'язано з меншою площею взаємодії наповнювача з полімерною матрицею.

Аналіз отриманих результатів модуля пружності дозволяє детальніше вивчити вплив гранулометричного складу та концентрації андезиту на фізико-механічні властивості полімерних композитів. Попередні результати показали, що суміш фракцій андезиту при високій концентрації забезпечує максимальний модуль пружності, тоді як тонкодисперсна фракція сприяє підвищенню механічної міцності при середніх концентраціях. Тепер важливо звернути увагу на інші властивості композитів, такі як щільність, водопоглинання, пористість та стійкість до стирання, які впливають на загальну стійкість і довговічність матеріалу.

Дані, наведені в таблиці 1, ілюструють зміну фізико-механічних параметрів композитів залежно від типу наповнювача, концентрації андезиту та гранулометричного складу. Зокрема, при збільшенні концентрації андезиту від 55 до 85 мас.% можна відзначити зменшення щільності матеріалу, що спостерігається для всіх типів фракцій.

Водночас водопоглинання матеріалів зменшується зі збільшенням концентрації наповнювача, що може бути пов'язано з меншою проникністю для води через ущільнення структури композиту при високих концентраціях. Винятком є крупнодисперсна фракція, яка демонструє найвищі показники водопоглинання, що може вказувати на підвищену пористість матеріалу з великими частинками наповнювача та їх гірше упакування в композиті.

Щодо пористості, загальна пористість має тенденцію до зменшення з підвищенням концен-

Таблиця 1

Фізико-механічні властивості композитів

Наповнювач	Концентрація, %	Густина, г/см ³	Водопоглинання за 24 год, %	Пористість загальна, %	Пористість відкрита, %	Стираність, г/см ²	Модуль пружності, Па/мм ²
Андезит $A_{\text{суміш фракцій}}$	55	1,33	8,82	11,75	8,82	0,01	44
	65	1,53	5,1	8,06	4,44	0,008	75
	75	1,62	2,72	4,40	2,72	0,008	69
	85	1,23	2,14	4,0	2,43	0,018	83
Андезит $A_{\text{мг}}$ фракція 1-2 мм	55	1,42	2,71	3,85	2,70	0,04	47
	65	1,42	5,38	7,67	5,38	0,010	68
	75	1,61	2,18	3,51	2,18	0,010	61
	85	1,77	1,81	3,2	5,38	0,026	56
Андезит $A_{\text{тд}}$ фракція < 0,5 мм	55	1,43	5,58	7,76	5,41	0,005	57
	65	1,54	4,32	6,66	4,82	0,006	48
	75	2,21	3,28	7,23	3,28	0,015	68
	85	1,85	1,83	3,39	1,83	0,044	72

трації наповнювача, особливо для тонкодисперсної фракції. Відкрита пористість знижується для суміші фракцій, що сприяє підвищенню щільності та зменшенню водопоглинання, роблячи цей матеріал більш стійким до впливу вологи. Водночас крупнодисперсна фракція зберігає вищий рівень відкритої пористості, що підтверджує її менш компактну структуру.

Стіранність композитів залишається низькою при високих концентраціях андезиту, що є важливим показником для матеріалів, які використовуються в умовах підвищеного тертя. Найвищі показники стірання спостерігаються для суміші фракцій при концентрації 85 мас.%, що вказує на високу зносостійкість цього матеріалу.

Отже, виходячи з одержаних даних, можна стверджувати, що змішаний гранулометричний склад ($A_{\text{нф}}$) і високі концентрації андезиту забезпечують найкращі показники механічної міцності, низьку пористість і високу стійкість до стірання, роблячи такі композити перспективними для застосування в умовах підвищених механічних навантажень. Отримані результати можуть бути корисними для розробки екологічно безпечних і економічно вигідних композитів, зокрема для будівництва та інших галузей промисловості, де необхідні матеріали з високою стійкістю до механічних навантажень.

Висновки.

1. При визначенні впливу гранулометричного складу на властивості композиту встановлено, що

суміш фракцій андезиту ($A_{\text{нф}}$) показала найкращі результати щодо модуля пружності та стійкості до стірання, особливо при високій концентрації наповнювача 85 мас.%. Це свідчить про переваги змішаного гранулометричного складу для рівномірного розподілу наповнювача в полімерній матриці, що сприяє підвищенню міцності та зносостійкості композиту.

2. Встановлено, що зі збільшенням концентрації андезиту зменшується загальна пористість і водопоглинання композиту, що позитивно впливає на його щільність і стійкість до дії води. Найбільші показники модуля пружності досягаються при високих концентраціях 85 мас.%, що робить такі композити перспективними для застосування в умовах підвищених навантажень.

3. Висока концентрація тонкодисперсної фракції ($< 0,1$ мм) зменшує водопоглинання та підвищує щільність матеріалу завдяки кращій упакованості частинок наповнювача і збільшеній площі поверхні для взаємодії з полімерною матрицею.

4. Найнижчі показники стіраності отримані для композитів із сумішню фракцій при концентрації 85 мас.%, що вказує на їх високу зносостійкість і підходить для матеріалів, що експлуатуються в умовах тертя.

5. Суміш фракцій андезиту при концентрації 85 мас.% є оптимальним варіантом для отримання композитів з високим модулем пружності, низькою пористістю, незначною стіраністю та хорошою стійкістю до вологи.

Список літератури:

1. Курта С.А. Наповнювачі – синтез, властивості та використання : навчальний посібник. Івано-Франківськ : Вид-во Прикарпат. нац. ун-ту ім. В. Стефаника. 2012. 296 с.
2. Сапронов О.О., Нігалатій В.Д., Клевцов К.М., Смирнов І.В. Вплив вмісту і природи дрібнодисперсного наповнювача на механічні властивості і структуру полімерних захисних покриттів. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2013. № 2 (9). С. 229-237.
3. Özkan Ş., Seylan H. The effects on mechanical properties of sustainable use of waste andesite dust as a partial substitution of cement in cementitious composites. *Journal of Building Engineering*. 2022. P. 104959. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104959>.
4. Білоусов О.Ю., Черняк Л.П., Шнирук О.М. Пориста кераміка на основі відсівів андезиту. *Modern scientific researches*. 2020. 12(1). P. 12-17. <https://doi.org/10.30889/2523-4692.2020-12-01-001>.
5. Çelikten S., Saridemir M., Sologlu M. Effects of elevated temperatures and cooling regimes on the waste andesite dust-based geopolymers mortars. *Construction and Building Materials*. 2024. 422. P. 135857. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135857>.
6. Шидловський М.С., Заховайко О.П., Тимошенко О.В., Мусієнко О. Практикум дослідження нових матеріалів. Частина 1. «Міцність і деформування полімерних та композиційних матеріалів при короткочасному навантаженні». К.: НТУУ «КПІ». 2017. 81 с.
7. Melnyk L. Formation of composite with variation of dispersity of filler and type of binder. *Technical sciences and technologies*. 2024. Vol. 1. №35. P. 198-203. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1\(35\)-198-203](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1(35)-198-203).
8. Мельник Л.І., Черняк Л.П., Пахомова В.М., Шнирук О.М. Керамічний композит на основі вулканічних порід. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2023. Т. 34(73). № 2. С. 52-57. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.2/10>.

9. Melnyk L.I., Cherniak L.P., Yevpak V.V. Composites based on fly ash with different polymer matrixes. *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*. 2024. Vol. 2. №1. P. 106-112. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.2/18>

10. Мельник Л. Формування композиту при варіюванні дисперсності наповнювача та виду зв'язуючого. *Технічні науки та технології : науковий журнал / Національний університет «Чернігівська політехніка»*. 2024. – № 1(35). С. 198-203. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1\(35\)-198-203](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1(35)-198-203).

11. Мельник Л.І., Свідерський В.А., Черняк Л.П. Особливості вулканічних порід як матеріалів для полімерних композитів. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2022. 1(305). С. 14-19. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2022-305-1-14-19>.

Melnyk L.I., Sviderskyi V.A., Kolobovnikova Ye.A. GRANULOMETRIC COMPOSITION AND CONCENTRATION OF ANDESITE AS FACTORS INFLUENCING THE PROPERTIES OF POLYMER COMPOSITES

This article investigates the effect of the granulometric composition and concentration of andesite screenings on the physicomechanical properties of polymer composites based on the styrene-butadiene aqueous dispersion Latex 2012. Composites with mineral fillers are widely used in industry due to their ability to enhance strength, wear resistance, and other performance characteristics. One promising filler is andesite, which, due to its crystalline structure and high hardness, can significantly improve the quality of polymer composites. However, the optimal properties of composites can only be achieved with the correct selection of the filler's particle size distribution and concentration.

In this study, three types of andesite fractions were used: a mixture of fractions (Apf), a coarse monofraction (Amg) with particle sizes of 0.16–0.20 mm, and a fine fraction (Atd) with particle sizes less than 0.1 mm. The filler concentration varied from 55 to 85 wt.%. The experimental results showed that the mixture of andesite fractions at a concentration of 85 wt.% provided maximum modulus of elasticity and wear resistance in the composite, explained by the uniform distribution of particles of various sizes, creating a strong interfacial zone. Meanwhile, the fine fraction at concentrations of 65 and 75 wt.% demonstrated high density and reduced water absorption, which are important factors for ensuring material durability.

It was also found that as the andesite concentration increased, the total porosity of the composites decreased, reducing their permeability to moisture and enhancing resistance to environmental factors. The open porosity and water absorption were the lowest in samples with the fine filler fraction, indicating a denser composite structure. Wear rates also remained low at high andesite concentrations, ensuring the durability of the composite under conditions of mechanical friction.

Thus, this study confirmed that the use of andesite as a filler can significantly improve the operational properties of polymer composites. Selecting the optimal particle size distribution and filler concentration provides high strength, low porosity, and wear resistance, making these materials promising for applications in construction, mechanical engineering, and other industries.

Key words: composite, filler, andesite, latex, granulometric composition, modulus of elasticity, concentration, porosity.