

Właściwości fizyczne pumeksu i jego zachowanie jako kruszywo grube w betonie

Physical properties of pumice and its behavior as a coarse aggregate in concrete

Słowa kluczowe: pumeks, beton lekki, kruszywo lekkie grube, wytrzymałość na ściskanie

Keywords: pumice, lightweight concrete, proportioning, lightweight coarse aggregate, compressive strength.

1. Wprowadzenie

Pumeks to skała magmowa pochodzenia wulkanicznego o dużej porowatości i małej gęstości, barwy kremowej, białej lub czasami szarej, zawierająca fazę szklistą (George, 1924, Boertje, 1994, Hossain, 2004, Bell, 2013). Jest to naturalny lekki materiał powstały w wyniku szybkiego schładzania stopionej masy wulkanicznej (Ankith, 2014; Tiab and Donaldson, 2015). Pumeks jest często stosowany jako kruszywo do produkcji betonów lekkich, w niektórych krajach (Hossain, 2004 r., Amato i in., 2012 r., Campione i in., 2015 r.). Jednak w przemyśle ekwadorskim jego wykorzystanie ogranicza się do produkcji elementów murowych lub jako kruszywo do mieszanek mineralno-asfaltowych (Crespo, 2015), tym samym ograniczając wykorzystanie jako kruszywo do betonu konstrukcyjnego, ponieważ uważane jest za kruszywo o przeciętnej jakości. (Martinez, 2014). Mimo to istnieją powody, które uzasadniają jego stosowanie. Jednym z nich, a być może najważniejszym, jest obfitość występowania tego materiału skalnego na obszarach otaczających tereny wulkaniczne, pochodzące z poprzednich erupcji (Murdock i in., 1979, Walker, 1981, Mehta i Mehta, 1986). Jest to czynnik, który może bezpośrednio wpływać na koszt produkcji betonu (Syverson, 2004, Akram i in., 2009, Manasseh, 2010, Minapu i in., 2014). Roboty budowlane to kolejny dobry dział aplikacji pumeksu, zważywszy że masa konstrukcji ma wpływ na projektowanie i wymiarowanie elementów konstrukcyjnych, a także na zauważalne oszczędności w fundamencie, dzięki efektowi zmniejszenia własnej masy (Mang'uriu i in. 2012).

Biorąc pod uwagę, że ekwadorskie wybrzeże znajduje się pięćdziesiąt kilometrów od strefy konwergencji południowoamerykańskich i karaibskich płyt kontynentalnych z płytą oceaniczną Nazca (Pardo-Casas i Molnar, 1987, Pindell i Barrett, 1990, Beck, 1993), co czyni to miejsce jednym z najbardziej aktywnych sejsmicznych na naszej planecie. Ekwador generuje około 15% do 20% całkowitej energii tellurycznej naszej planety (Giesecke i in., 2004)

1. Introduction

Pumice is a very well known glassy igneous rock of volcanic origin, having a high porosity and low density, possessing a cream white or occasionally grey color (George, 1924; Boertje, 1994; Hossain, 2004; Bell, 2013). It is a natural lightweight material formed due to the rapid cooling of molten volcanic mass (Ankith, 2014; Tiab and Donaldson, 2015). This material is frequently used as aggregate for lightweight concrete in some countries around the world (Hossain, 2004; Amato et al, 2012; Campione et al., 2015). However, in the Ecuadorian industry its usage has been focused in the manufacturing of masonry blocks or as a fine aggregate for asphalt mixtures (Crespo, 2015), thereby relegating its use as an aggregate for structural concrete due to it being considered a low quality aggregate (Martinez, 2014). In spite of this there are reasons that justify its structural usage; one of them and perhaps the most important one is taking advantage of the abundance of this material in volcano-surrounding areas, originating from past eruptions (Murdock et al., 1979; Walker, 1981; Mehta and Mehta, 1986), a factor that can directly influence the production cost of concrete (Syverson, 2004; Akram et al., 2009; Manasseh, 2010; Minapu et al, 2014). The implementation of civil works is another reason to employ pumice, given that the mass of the structures is an influencing factor in the design and dimensioning of structural elements, as well as noticeable cost savings in the foundation due to the effect of reducing its own mass (Mang'uriu et al. 2012).

Considering that the Ecuadorian coast is located fifty kilometers away from the convergence zone of the South American and Caribbean continental plates with the oceanic Nazca plate (Pardo-Casas and Molnar, 1987; Pindell and Barrett, 1990; Beck, 1993), being one of the most seismic zones of the planet. Ecuador is liberating around 15% to 20% of the total telluric energy of the whole planet (Giesecke et al, 2004) and becomes a permanent seismic hazard zone (Toulkeridis et al., 2017; Parra et al., 2016). Therefore it is

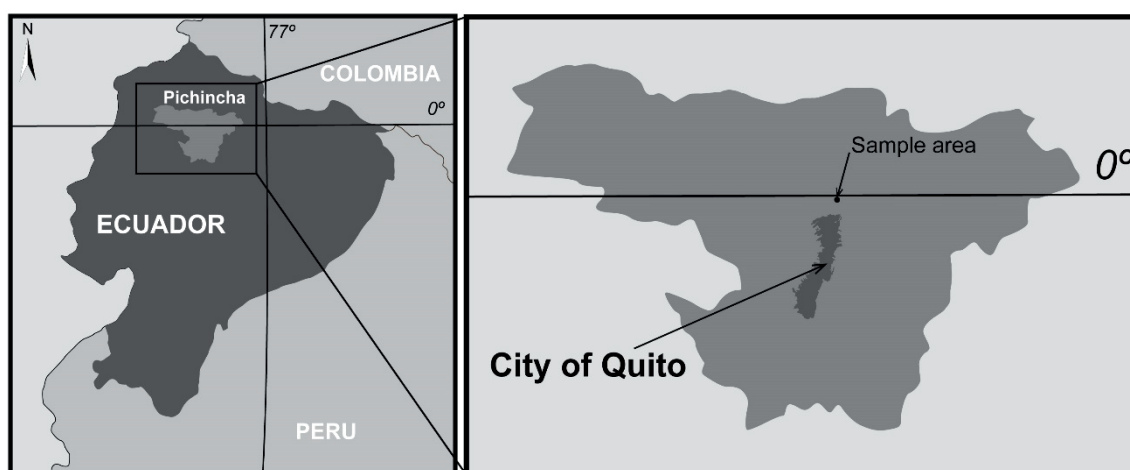


Fig. 1. Geographical location of the procurement zone of the pumice and other study aggregates

Rys. 1. Położenie geograficzne obszaru wydobywania pumeksu i innych badanych kruszyw

i jednocześnie jest strefą zagrożenia sejsmicznego (Toulkeridis i in., 2016; Parra i in., 2016). Dlatego konieczne jest poszukiwanie różnych form zmniejszania obciążeń konstrukcji budowlanych, co jest charakterystyczną właściwością pumeksu, którego gęstość jest znacznie mniejsza od kruszyw konwencjonalnych (Parhizkar i in., 2012, Ramasamy i Muralitharan, 2015).

Zmniejszenie obciążenia własnego konstrukcji jest równoważne z możliwością zwiększenia jej obciążenia użytkowego (Alexanderson, 1979), co prowadzi do optymalizacji wykorzystania zasobów. Celem tego badania było określenie wpływu pumeksu jako kruszywa grubego do produkcji betonu i porównanie z betonem wytwarzanym z konwencjonalnego kruszywa grubego. Jednakże, aby uznać pumeks za materiał budowlany, należy wcześniej ocenić jego właściwości (Gündüz i Ugur, 2004). Dlatego konieczne jest gruntowne doświadczalne zbadanie materiałów, które będą wykorzystywane w budownictwie. Jest to podstawa każdej analizy materiałowej opierającej na modelach inżynierii stosowanej (Gündüz i Ugur, 2004). Badania wytrzymałości na ściskanie pumeksu wulkanicznego stosowanego jako zamiennik kruszywa grubego przeprowadzono na próbkach cylindrycznych przygotowanych przez Mitad del Mundo w prowincji Pichincha w Ekwadorze [rysunek 1].

2. Materiały i metody

Przeprowadzono badania laboratoryjne na lekkim kruszywie pumeksowym oraz na konwencjonalnych kruszywach drobnych i grubych, określając ich właściwości mechaniczne i fizyczne, w celu zbadania ich przydatności jako kruszyw do betonu. Identyczne badania zostały wykonane na obu rodzajach kruszyw, które obejmowały: rozkład wielkości ziaren, gęstość, absorpcję wody, odporność na rozdrabnianie, zawartość wilgoci i gęstość nasypową.

2.1. Rozkład wielkość ziaren

Wielkość ziaren ma bezpośredni wpływ na mechaniczne właściwości betonu. Przeprowadzono badanie lekkiego kruszywa

imperative to look for different forms of lowering the structural dead load, a fact being offered by the characteristics of Pumice, presenting lower density than conventional aggregates (Parhizkar et al., 2012; Ramasamy and Muralitharan, 2015).

The reduction of dead load in the structure becomes equivalent towards an increase in the capacity of bearing live load (Alexanderson, 1979) resulting into a method of resource optimization. The objective of this investigation has been to determine the effects of pumice as a coarse aggregate for the manufacturing of concrete and to obtain the comparison with concrete manufactured from conventional coarse aggregate. However, in order to consider pumice as a construction material its properties need to be evaluated beforehand (Gündüz and Ugur, 2004). Therefore, it is necessary to thoroughly analyze the materials that will be experimentally utilized in construction. This constitutes the backbone of any material analysis that uses models of applied engineering (Gündüz and Ugur, 2004). Volcanic pumice applied as a replacement of coarse aggregate for the study of compressive strength which was conducted on the concrete cylinders prepared for this investigation by the Mitad del Mundo sector in the Pichincha province, Ecuador [Fig.1].

2. Materials and methods

Various trials were performed in the lab on the pumice lightweight aggregate and on the conventional fine and coarse aggregates in order to determine their mechanical and physical properties, with the goal of researching their suitability as concrete aggregates. Identical assays were performed on the conventional aggregate, being grain size distribution, dry density, water absorption, degradation, moisture content and bulk density.

2.1. Grain size distribution

The size of the aggregates has a direct effect in the concrete's mechanical behavior. For this reason, the classification of the pumice lightweight aggregate and the conventional aggregate were

Tablica 1 / Table 1

ROZKŁAD WIELKOŚCI ZIAREN PUMEKSU I KRUSZYW KONWENCJONALNYCH

GRAIN SIZE DISTRIBUTION OF THE LIGHTWEIGHT (PUMICE) AND CONVENTIONAL AGGREGATES OBTAINED IN THE LAB

GRIAN SIZE DISTRIBUTION OF THE LIGHTWEIGHT AGGREGATES [PUMICE] SKŁAD ZIARNOWY KRUSZYWA LEKKIEGO [PUMEKSU]				
Sieve number Rozmiar sita	Mass retained Pozostałość na sicie, g	Mass accumulated Masa skumulowana, g	Mass accumulated Masa skumulowana, %	Accumulated passing Pozostałość skumulowana, %
No. 1"	605.20	605	8.6	91.35
No. 3/4"	1167.60	1773	25.3	74.68
No. 1/2"	2095.80	3869	55.3	44.74
No. 3/8"	1073.60	4942	70.6	29.40
No. 4	1773.50	6716	95.9	4.06
No. 8	162.10	6878	98.3	1.75
No. 8 passing	122.40	7000		
Sample initial mass Początkowa masa próbki, g		7012.2		
Nominal maximum size Rozmiar maksymalny sita		1"		
GRIAN SIZE DISTRIBUTION OF THE CONVENTIONAL AGGREGATES SKŁAD ZIARNOWY KRUSZYWA KONWENCJONALNEGO				
Sieve number Rozmiar sita	Mass retained Pozostałość na sicie, g	Mass accumulated Masa skumulowana, g	Mass accumulated Masa skumulowana, %	Accumulated passing Pozostałość skumulowana, %
No. 1"	1993.80	1994	16.7	83.29
No. 3/4"	4079.70	6074	50.9	49.10
No. 1/2"	3781.80	9855	82.6	17.41
No. 3/8"	1222.30	11078	92.8	7.16
No. 4	783.10	11861	99.4	0.60
No. 8	9.60	11870	99.5	0.52
No. 8 passing	62.10	11932		
Sample initial mass Początkowa masa próbki, g		11948.43		
Nominal maximum size Rozmiar maksymalny sita		1"		

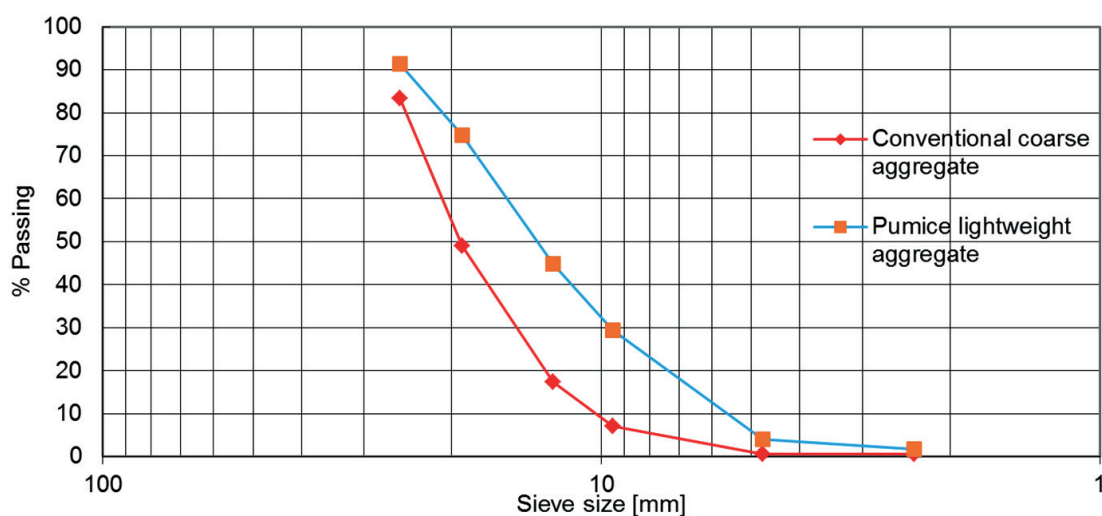


Fig. 2. Comparison between grain size distribution curves of the conventional coarse aggregate and the pumice lightweight aggregate

Rys. 2. Rozkład wielkości ziaren konwencjonalnego kruszywa grubego i lekkiego kruszywa pumeksowego

Tablica 2 / Table 2

GĘSTOŚĆ I ABSORPCJA WODY KRUSZYWA LEKKIEGO I KONWENCJONALNEGO

DENSITY AND WATER ABSORPTION OF THE LIGHTWEIGHT AND CONVENTIONAL AGGREGATES

DENSITY AND WATER ABSORPTION OF THE CONVENTIONAL COARSE AGGREGATES GĘSTOŚĆ I ABSORPCJA WODY GRUBEGO KRUSZYWA KONWENCJONALNEGO (ASTM C 127-07)		
Property / Właściwość	Symbol Oznaczenie	Value Wartość
Mass of the oven dried sample / Masa suchej próbki, g	A	3837.6
Mass of the saturated sample, superficially dry / Masa próbki w stanie powietrzno-suchym, g	B	3998.3
Apparent mass in water of the saturated sample / Masa próbki nasyconej wodą, w wodzie, g	C	2288.62
Density of water / Gęstość wody, g/cm ³	Y	1.00
Apparent dry density / Gęstość pozorna, g/cm ³	A/(A-C)	2.478
Specific Weight / Gęstość właściwa, g/cm ³	A/(B-C) * Y	2.24
Absorption / Absorpcja, %	(B-A)/A * 100	4.1
ABSORPTION OF THE LIGHTWEIGHT AGGREGATE ABSORPCJA KRUSZYWA LEKKIEGO (ASTM C 127-07)		
Property / Właściwość	Symbol Oznaczenie	Value Wartość
Mass of the oven dried sample / Masa suchej próbki, g	A	454.96
Mass of the saturated sample, superficially dry / Masa próbki w stanie powietrzno-suchym, g	B	500.00
Absorption / Absorpcja, %	(B-A)/A * 100	9.90
DENSITY OF THE LIGHTWEIGHT AGGREGATE GĘSTOŚĆ KRUSZYWA LEKKIEGO (Jiménez –Salas, 2001)		
Property	Symbol	Value
Petri box weight + mercury / Szalka Petriego + rtęć, g	A	761.20
Petri box weight + spilled mercury / Szalka Petriego bez rtęci, g	B	678.75
Mercury density / Gęstość rtęci, g/cm ³	C	13.50
Mas of mercury / Masa rtęci, g	D	82.45
Mass of pumice / Masa pumeksu, g	E	4.40
Volume of pumice / Objętość pumeksu, cm ³	F= D/C	6.11
Pumice density / Gęstość pumensu, g/cm ³	G= E/F	0.72

pumekowego i kruszywa konwencjonalnego w celu ustalenia, czy mogą one być zaliczone do kruszyw betonowych zgodnie z normami ASTM C136 i AASHTO nr T 27 (ASTM, 2007; Bailey and Baldini, 2007; Ameri and Behnood, 2012, Maier i Durham, 2012). Oznaczono również współczynnik jednorodności C_u i współczynnik kształtu C_c , które określają jakość kruszywa [Tablica 1, rysunek 2].

2.2. Gęstość i absorpcja wody

Te dwie właściwości fizyczne grubego kruszywa konwencjonalnego określono zgodnie z ASTM C127-07, natomiast gęstość pumeksu oznaczono zgodnie z zaleceniami wcześniejszych prac (Jimenes-Salas i De Justo, 2001; Ameratunga i in. 2016), mając na uwadze, że metoda podana w ASTM C127-07 nie może być zastosowana do lekkiego materiału porowatego, jakim jest pumeks (Tablica 2).

2.3. Odporność na rozdrabnianie

Badanie określa odporność kruszywa grubego na rozdrabnianie, w oparciu o utratę masy w bębnie Los Angeles. Wyniki tego badania określają, czy kruszywo nadaje się do wykorzystania do betonu

performed in order to determine if they are qualified as concrete aggregates according to ASTM C136 and Norm AASHTO No. T 27 (ASTM, 2007; Bailey and Baldini, 2007; Ameri and Behnood, 2012; Maier and Durham, 2012), the results of the uniformity coefficient C_u and the curvature coefficient C_c , which defines if the soil is well or badly graded, are also discussed (Table 1; Fig. 2).

2.2. Density and water absorption

These two physical properties were determined according to ASTM C127-07 for the conventional coarse aggregate, whereas the density of pumice has been determined according to previous studies (Jimenes-Salas and De Justo, 2001; Ameratunga et al. (2016), given that method ASTM C127-07 cannot be applied to a lightweight porous material, such as pumice (Table 2).

2.3. Degradation

This trial determines the degradation value of the coarse aggregate, based on the loss of mass due to abrasion and impact using the Los Angeles testing machine. The results of this test

Tablica 3 / Table 3

WYNIKI ODPORNOŚCI NA ŚCIERANIE KRUSZYWA KONWENCJONALNEGO I LEKKIEGO

RESULTS OF THE DEGRADATION EXAMINATION OF THE CONVENTIONAL COARSE AGGREGATE AND THE LIGHTWEIGHTAGGREGATE

Conventional aggregate degradation results / Wyniki badania kruszywa konwencjonalnego		
Property / Właściwość	Symbol / Oznaczenie	Value / Wartość
Dry sample mass before test/ / Masa próbki przed badaniem, g	P1	4994.35
Dry sample mass after test/ / Masa próbki po badaniu, g	P2	3202.8
Abrasion percentage/ / Ubytek masy, %	$\% = 100 (P1 - P2) / P1$	35.87
Pumice lightweight aggregate degradation results/ / Badanie kruszywa pumeksowego		
Property / Właściwość	Symbol Oznaczenie	Value Wartość
Dry sample mass before test/ / Masa próbki przed badaniem, g	P1	4994.35
Dry sample mass after test/ / Masa próbki po badaniu, g	P2	2598.06
Abrasion percentage/ / Ubytek masy, %	$\% = 100 (P1 - P2) / P1$	47.98

według normy ASTM C131-03, która określa że jeśli ubytek masy jest większy od 50%, kruszywo nie jest odporne na ścieranie, co powoduje, że materiał jest nieodpowiedni do betonu [tablica 3].

2.3. Gęstość nasypowa w stanie suchym

Badanie określa dwie właściwości, które są niezbędne przy różnych metodach projektowania składu mieszanki betonowej, czyli gęstość nasypową i objętość suchego kruszywa w stanie utrzesionym, zgodnie z normą ASTM C29-09 [tablica 4].

2.4. Zawartość wilgoci

Badanie określa procentową zawartość wilgoci oznaczaną poprzez suszenie próbki kruszywa, co uwzględnia wilgoć powierzchniową i wilgoć zawartą w porach kruszywa, zgodnie z normą ASTM C566-04. Materiały pochodzące z okolic wulkanów zwykle wy-

determines if the aggregate is suitable to be used as an aggregate for concrete conforming to ASTM C131-03, which establishes that if the aggregate degradation is above 50% it is not capable of resisting abrasion, which renders the material unsuitable for concrete (Table 3).

2.3. Dry and bulk density

This trial determines the bulk density and volumetric mass of the coarse aggregate in compact state conforming to ASTM C29-09, values which are necessary in various methods for the design of the composition of concrete (Table 4).

2.4. Moisture content

This test determines the percentage of evaporable moisture by drying the sample of coarse aggregate, both corresponding to

Tablica 4 / Table 4

GĘSTOŚĆ NASYPOWA I OBJĘTOŚĆ KRUSZYWA KONWENCJONALNEGO I LEKKIEGO

DRY AND BULK DENSITY OF THE CONVENTIONAL AND LIGHTWEIGHT AGGREGATES

Conventional coarse aggregate / Kruszywo konwencjonalne grube		
Container No. / Numer pojemnika	1	2
Mass of empty container / Masa pustego pojemnika, g	7700	7700
Mass of container + aggregate / Masa pojemnika z kruszywem, g	20020	19996
Mass of aggregate / Masa kruszywa, g	12320	12296
Volume of container / Objętość pojemnika, cm ³	13646.29	13646.29
Dry and bulk density / Gęstość nasypowa w stanie suchym, g/cm ³	0.903	0.901
Average bulk density / Średnia gęstość nasypowa, g/cm ³	0.902	
Pumice coarse lightweight aggregates / Grube kruszywo pumeksowe lekkie		
Container / Pojemnik	1	2
Mass of empty container / Masa pustego pojemnika, g	2101.5	2101.5
Mass of container + aggregate / Masa pojemnika z kruszywem, g	13221.1	13275.6
Mass of aggregate / Masa kruszywa, g	11119.6	11174.1
Volume of container / Objętość pojemnika, cm ³	6794.05	6794.05
Dry and bulk density / Gęstość nasypowa w stanie suchym, g/cm ³	1.637	1.645
Average bulk density / Średnia gęstość nasypowa, g/cm ³	1.641	

Tablica 5 / Table 5

NATURALNA WILGOTNOŚĆ KRUSZYWA LEKKIEGO I KONWENCJONALNEGO
 NATURAL MOISTURE OF THE CONVENTIONAL AND LIGHTWEIGHT AGGREGATES

Conventional coarse aggregate/ / Kruszywo grube konwencjonalne		
Container / Pojemnik	1	2
Mass of empty container / Masa pustego pojemnika, g	105.74	131.10
Mass of container + moisture sample / Masa pojemnika z zawilgoconą próbką, g	1338.86	1277.60
Mass of container + dry sample / Masa pojemnika z suchą próbką, g	1324.51	1258.16
Mass of water / Masa wody, g	14.35	19.44
Dry mass / Masa suchej próbki, g	1218.77	1127.06
Moisture content / Zawartość wilgoci, %	1.18	1.72
Average Moisture / Średnia zawartość wilgoci, %	1.45	
Pumice coarse lightweight aggregates / Grube kruszywo lekkie pumeksowe		
Container / Pojemnik	1	2
Mass of empty container / Masa pustego pojemnika, g	25.75	25.75
Mass of container + moisture sample / Masa pojemnika z zawilgoconą próbką, g	141.74	145.87
Mass of container + dry sample / Masa pojemnika z suchą próbką, g	135.57	138.97
Mass of water / Masa wody, g	6.17	6.91
Dry mass / Masa suchej próbki, g	109.82	113.22
Moisture content / Zawartość wilgoci, %	5.62	6.10
Average Moisture / Średnia zawartość wilgoci, %	5.86	

kazują większy udział wilgoci naturalnej (Segura Castruit et al, 2003, tablica 5).

2.5. Projektowanie mieszanki betonowej

Do wykonania badań zaprojektowano dwie różne mieszanki betonowe, zgodne z metodą ACI-211. Jedną przygotowano z kruszywa konwencjonalnego, a w drugim kruszywo konwencjonalne zastąpiono kruszywem lekkim pumeksowym. Mieszanki zaprojektowano dla objętości 26507,2 cm³, co odpowiada pięciu formom cylindrycznym. Dodatkowo, mieszanki zaprojektowano tak, aby uzyskać beton o wytrzymałości na ściskanie 25 MPa.

Do badań stosowano materiał pochodzący z kamieniołomów zajmujących się produkcją kruszyw, który może być używany jako konwencjonalne kruszywo drobne. Kruszywo, zgodnie z normą ASTM C28-07a, poddano badaniom określającym: gęstość nasypową w stanie suchym, procentową absorpcję wody [zgodnie z ASTM C28-07a], zawartość wilgoci naturalnej (ASTM C566-04) oraz wskaźnik mialkości kruszywa (ASTM C136-06). W tablicy 6 podano składy mieszanek zaprojektowanych betonów.

2.6. Badania próbek walcowych

Kruszywem pumeksowym zastąpiono 100% kruszywa konwencjonalnego, gdyż celem było określenie ilościowej zależności pomiędzy właściwościami mechanicznymi próbek z kruszywem konwencjonalnym i kruszywem lekkim. Wytrzymałość na ściskanie zbadano zgodnie z normą ASTM C39-05. Badania przeprowadzono po 7, 14, 21 i 28 dniach dojrzewania. Dodatkowo, próbkę każdej z mieszanek poddano również procesowi przyspieszonego

superficial moisture and moisture contained in the aggregate pores conforming to ASTM C566-04. Materials originating from areas surrounding volcanoes commonly present a higher percentage of natural moisture (Segura Castruit et al, 2003; Table 5).

2.5. Design of the concrete mixture

For this study two different mixes were produced conforming to the method ACI-211, of which for the first one was used conventional coarse aggregate and in the second one the conventional aggregate was replaced by lightweight pumice aggregate. The mixture has been designed for a volume of 26507.2 cm³, which equals five test cylinders. Additionally the mixture has been designed to reach a compressive strength of 25 MPa.

The material used as a fine aggregate in this study, originated from commercial quarries and may be labeled as conventional fine aggregate. The tests to determine the physical properties have been the following: apparent dry density according to ASTM C28-07a, absorption in % according to ASTM C28-07a, natural moisture according to ASTM C566-04 and fineness modulus according to ASTM C136-06. Table 6 demonstrates the proportioning used for the present study.

2.6. Tests of cylinders

The pumice aggregate replaced 100% of the conventional aggregate. This has been performed in order to encounter a quantitative relationship between the mechanical behaviors of the testing cylinders of conventional concrete and of the lightweight concrete; the compressive strength was measured according to ASTM C39-05.

SKŁADY ZAPROJEKTOWANYCH MIESZANEK BETONOWYCH

PROPORTIONING OF THE CONVENTIONAL AND LIGHTWEIGHT CONCRETE MIXTURES

Proportioning for 5 conventional concrete cylinders / Skład betonu z kruszywem konwencjonalnym			
Material Materiał	Proportions [volume respect to cement] Udział objętościowy [w odniesieniu do cementu]	Dry mass Masa składników suchych, kg	Moisture Masa składników wilgotnych, kg
Cement	1	18.256	18.256
Fine aggregate / Kruszywo drobne	1.36	24.828	25.623
Coarse aggregate / Kruszywo grube	2.2	40.163	40.756
Water / Woda	0.39	7.12	5.964
Proportioning for 5 pumice lightweight concrete cylinders / Skład betonu z pumekowym kruszywem lekkim			
Material Materiał	Proportions [volume respect to cement] Udział objętościowy [w odniesieniu do cementu]	Dry mass Masa składników suchych, kg	Moisture Masa składników wilgotnych, kg
Cement	1	14.32	14.32
Fine aggregate / Kruszywo drobne	2.74	39.24	40.49
Coarse aggregate / Kruszywo grube	2.18	31.22	33.05
Water / Woda	0.52	7.53	6.06

dojrzewania, przez 5 dni zgodnie z normą ASTM C918-13. Porównano wyniki badań każdej z mieszanek.

3. Wyniki i dyskusja

3.1. Właściwości kruszyw

Użycie zbyt grubego kruszywa może powodować złą konsystencją betonu. Najlepsze właściwości mieszanki betonowej uzyskuje się w przypadku kruszyw, w których nie ma zbyt dużych różnic, a także nieciągłości w rozkładzie wielkości ziaren (Kosmatka i Wilson, 2016). Wyniki badania rozkładu wielkości ziaren badanych kruszyw pokazano na rysunku 2. Oznaczone składy ziarnowe obu kruszyw, konwencjonalnego i lekkiego, są podobne. Znajduje to również odzwierciedlenie w wartościach współczynników jednorodności, wynoszących 2,02 dla kruszywa konwencjonalnego i 2,78 dla kruszywa pumekowego. Wobec tych małych wartości i braku zbyt dużych zmian poziomych przebiegu krzywych nie wykazują one nagłych zmian średnic, co odzwierciedlają wartości współczynników kształtu: odpowiednio 1,1 i 1,0 dla kruszywa konwencjonalnego i pumeksu. Jednak z drugiej strony, ich gęstości nasypowe są dosyć rozbieżne. Z tablicy 2 wynika, że grube kruszywo konwencjonalne ma ponad trzykrotnie większą gęstość [2,48 g/cm³] od kruszywa lekkiego [0,72 g/cm³]. Podobne wyniki uzyskali w badaniach Mang'uriu i in. (2012), w których zmierzone gęstości wynosiły 0,574 g/cm³ dla pumeksu i 1,956 g/cm³ dla kruszywa konwencjonalnego. Obydwa kruszywa pochodziły z Mai Mahiu, Kenia.

W odniesieniu do badań absorpcji wody, kruszywo konwencjonalne wykazało absorpcję na poziomie 4,1%, podczas gdy pumeks

The resistance of the concrete cylinders has been tested at 7 days, 14 days, 21 days and 28 days of curing. Additionally, a sample from each mixture, underwent also a rapid curing process, applied for 5 days according to ASTM C918-13. The results of the compressive strength were determined and analyzed for each mixture.

3. Results and discussion

3.1. Aggregate properties

When aggregates are too coarse, than they may produce rigid mixtures, whereas aggregates that do not possess a great deficiency or excess in size, having a regular grain size distribution curve, will give more satisfactory results (Kosmatka and Wilson, 2016). For the present study the grain size distribution of aggregates which is shown in Fig. 2 is presenting the similar curves for the lightweight and conventional aggregates. This indicates that the aggregates nominal sizes donot underwent any abrupt variations and maintain some similarity among each other. That is reflected in the values of the uniformity coefficients, being 2.02 for the conventional aggregate and 2.78 for the pumice aggregate. In spite of being low values and indicating that the cuve does not extend to much horizontally, it does not present abrupt changes of diameters, something reflected by the values of the curvature coefficients: 1.06 and 1.02 for the conventional and pumice aggregates respectively. On the other hand in the apparent dry density trial the results are quite far apart. Table 2 indicates that the conventional coarse aggregate, with a density of 2.48 g/cm³, has more than 3 times higher density of the lightweight aggregate, which is equal 0.72 g/cm³. Similar results were presented in the study performed by Mang'uriu et al (2012), in which the density values obtained are 0.574 g/cm³ for pumice and 1.956 g/cm³ for the conventional

Tablica 7 / Table 7

WYNIKI WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCISKANIE BETONÓW Z KRUSZYWA KONWENCJONALNEGO I LEKKIEGO

RESULTS OF THE COMPRESSIVE STRENGTH OF CONVENTIONAL AND LIGHTWEIGHT CONCRETES

Concrete from conventional aggregate / Beton z kruszywa konwencjonalnego			
Cylinder age, days Czas dojrzewania, dni	Cylinder mass / Masa walca, g	Load / Obciążenie, kg	Compressive strength Wytrzymałość na ściskanie, MPa
5 [rapid curing] [dojrzewanie przyspieszone]	12423.1	28765	18.18
7	12064.8	17885	10.79
14	12136.2	26770	15.15
21	12245.4	36171	20.82
28	12364.8	45572	25.45
Concrete from lightweight aggregate / Beton z kruszywa lekkiego			
Cylinder age, days Czas dojrzewania, dni	Cylinder mass Masa próbki, g	Load Obciążenie, kg	Compressive strength Wytrzymałość na ściskanie, MPa
5 [rapid curing] [dojrzewanie przyspieszone]	12423.1	18960	10.45
7	12064.8	15832	8.96
14	12136.2	19832	10.93
21	12245.4	22832	12.58
28	12364.8	30832	17.45

9,9%, czyli ponad dwa razy większą [tablica 2]. To z kolei oznacza, że beton wytwarzany z pumeksu jest bardziej porowaty niż beton z konwencjonalnego kruszywa grubego. Porowatość jest ważnym czynnikiem determinującym właściwości stwardniałego betonu, gdyż zwiększa jego podatność na penetrację roztworów korozyjnych oraz wpływa na wytrzymałość na ściskanie (Quintero Ortiz i in., 2011).

Badania odporności na rozdrabnianie wykazały znacznie większy ubytek masy lekkiego kruszywa pumekсового od kruszywa konwencjonalnego, a wynosił on odpowiednio 48% i 35,9%. Wynika to ze struktury i składu fazowego pumeksu. Gęstość nasypowa kruszywa lekkiego wynosiła 0,90 g/cm³, natomiast kruszywa konwencjonalnego 1,64 g/cm³. Jest to oczywista różnica, wynikająca z występowania pustek w pumeksie.

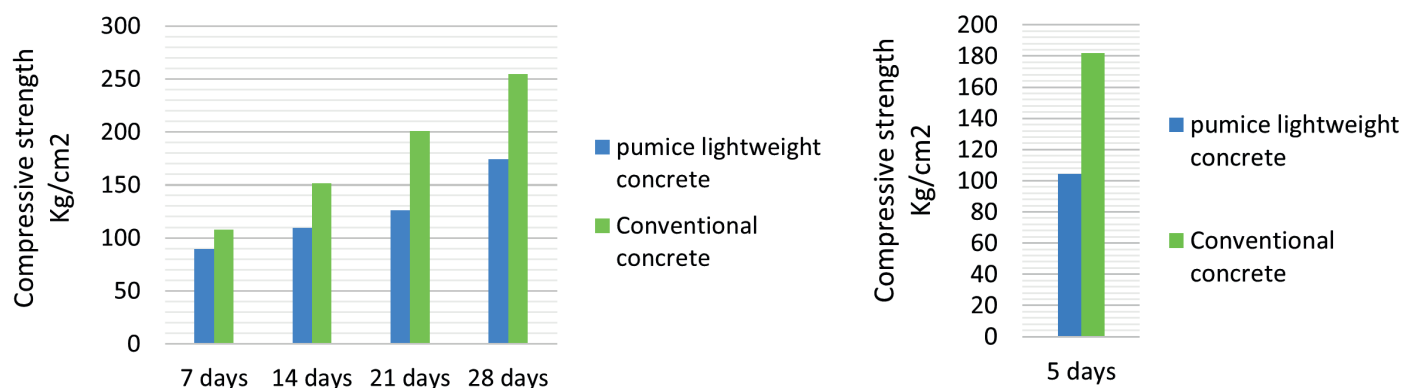
Badania zawartości wilgoci wykazały, że wilgotność pumekсового kruszywa wynosi 5,86%, natomiast kruszywa konwencjonalnego 1,45%. Kovler i Jensen (2005), jak również Bentz i Stutzman (2006), a także Lura i in., (2006) wyrażają opinię, że migracja wody z pustek w pumeksie aggregate do zaczynu cementowego daje korzystny efekt, ponieważ powoduje tak zwaną "pielęgnację wewnętrzną". Wiąże się to ze zmniejszeniem skurczu, szczególnie w przypadku tak zwanego skurczu samorzutnego [autogenicznego], w przypadku małego stosunku w/c w betonie. Opinia ta jest powszechnie akceptowana. Dlatego z pewnością można stwierdzić, że wyniki wytrzymałości na ściskanie betonu z kruszywa konwencjonalnych i lekkich zależą od ich różnych właściwości fizycznych tych rodzajów kruszyw.

aggregate, both originating from Mai Mahiu, Kenya.

With regards to the water absorption tests, the conventional aggregate has a 4.1% of absorption whereas pumice has more than twice of this absorption equal 9.9% (Table 2). This in turn means that the concrete manufactured from pumice is more porous than that of the conventional coarse aggregate. Porosity is an important factor that influences the concrete, increasing the entrance of aggressive liquids into the cement matrix and affecting its compressive strength (Quintero Ortiz et al., 2011).

The degradation trials have shown that the pumice lightweight aggregate demonstrated higher loss of mass due to abrasion than the conventional coarse aggregate with abrasion of 47.98% and 35.87% respectively. This has been due to the superficial texture and physical properties of pumice. By contrast, the result of the bulk density or volumetric mass trial reflected that the lightweight aggregate, with a value of 0.902 g/cm³, has less mass per unit volume than the conventional aggregate, which possesses a value of 1.64 g/cm³. This is justified by the content of empty space that pumice has in its composition.

The moisture content tests have shown that the pumice lightweight aggregate has a 5.86% humidity, compared to a 1.45% humidity of the conventional aggregate. Kovler and Jensen, as well as Bentz and Stutzman are of the opinion that the migration of water from the pumice aggregate to the cement paste has a beneficial effect, because it is causing so called "intern nursing" (Kovler and Jensen, 2005; Lura et al., 2006; Bentz and Stutzman, 2006). It is linked with the shrinkage decrease, particularly in the case of so



Rys. 3. Porównanie wyników wytrzymałości na ściskanie: po lewej po 7, 14, 21 i 28 dniach, po prawej po 5 dniach przyspieszonego dojrzewania

Fig. 3. Comparison of the results of compressive strength. Left, after 7, 14, 21 and 28 days of curing. Right, five days of rapid curing

3.2. Pomiary wytrzymałości na ściskanie

Wytrzymałość na ściskanie betonu z kruszywa pumekowego, po 28 dniach, wynosi 17,45 MPa, co stanowi 68,6% wytrzymałości na ściskanie betonu z kruszywem konwencjonalnym, o wytrzymałości 25,45 MPa [tablica 7, rysunek 3]. Podobne wyniki opublikowali wcześniej Ramasamy i Muralitharana (2015), wykazując, że wytrzymałość na ściskanie betonu z pumeksu z Tamilnadu w Indiach, wynosi 56% wytrzymałości na ściskanie betonu z kruszywa konwencjonalnego. Stwierdzono także, że wytrzymałość na ściskanie po 5 dniach przyspieszonego dojrzewania wynosi około 70% wytrzymałości po 28 dniach. Przyspieszone badanie jest przydatne do wcześniejszego oszacowania wytrzymałości [tablica 7, rysunek 3].

4. Podsumowanie

Na podstawie uzyskanych wyników badań można stwierdzić, że zastępując 100% kruszywa konwencjonalnego lekkim kruszywem pumekowym otrzymano beton o gorszej jakości, z mniejszą o 31% wytrzymałością na ściskanie. Jednak wyniki wykazują, że pomimo zmniejszenia wytrzymałości, pumeks może być stosowany jako kruszywo grube do wytwarzania betonu lekkiego, dzięki małej gęstości pumeksu w porównaniu do gęstości kruszywa konwencjonalnego. Można go zastosować wszędzie tam, gdzie obciążenie konstrukcji jest małe, na przykład w domach jednorodzinnych, a także jako kruszywo lekkie do betonów stropowych, w przypadku których obciążenia eksploatacyjne są minimalne. Niewątpliwą zaletą jest obfitość występowania takich kruszyw na obszarach wulkanicznych.

Wyniki badania absorpcji wykazały, że pumeks jako materiał porowaty wykazuje większą absorpcję niż kruszywo konwencjonalne, co jest podstawowym czynnikiem wpływającym na proces wytwarzania mieszanki, gdyż duża ilość wody zaabsorbowana szybko przez kruszywo ma bezpośredni wpływ na projektowaną wytrzymałość.



Fig. 4. Test cylinders of conventional (left) and pumice lightweight concrete (right) after compressive strength measurements

Rys. 4. Walce z kruszywa konwencjonalnego [po lewej] i z kruszywa lekkiego [po prawej], po badaniu wytrzymałości

called autogenous shrinkage, in the case of concrete with low w/c ratio. This opinion is generally accepted.

Therefore, we certainly are able to infer that the results of the compressive strength performed on the conventional and lightweight concrete cylinders are influenced by the physical discrepancies of the coarse aggregates used respectively.

3.2. Compressive strength measurements

The compressive strength of the pumice lightweight concrete at 28 days is 17.45 MPa, which represents 68.56% of the compressive strength of the concrete manufactured from conventional aggregate, with the strength of 25.45 MPa (Table 7; Fig. 3). Similar results were determined in the study performed by Ramasamy and Muralitharan (2015) in which they determined that the compressive strength of concrete manufactured with pumice originating from Tamilnadu in India, represents 56% of the compressive strength of concrete manufactured with conventional aggregate. Furthermore, the results of compressive strength measurements performed at 5 days of rapid curing, represent roughly 70% of the compressive strength expected at the end of the 28 days. This process is useful in order to perform an early estimate of the results (Table 7; Fig. 3).

Podziękowania

Autorzy dziękują za pomoc udzieloną w doświadczeniach laboratoryjnych przez inż. Juana Haro. Są również wdzięczni za pozwolenie na pobieranie próbek pumeksów właścicielowi kamieniołomu w Rumicucho, w północnym Quito. Dziękujemy również Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE za wsparcie logistyczne i finansowe.

References / Literatura

1. T. Akram, S. A. Memon, H. Obaid., Production of low cost self compacting concrete using bagasse ash. *Constr. Build. Mat.*, **23**, 2, 703-712 (2009).
2. J. Alexanderson, Relations between structure and mechanical properties of autoclaved aerated concrete. *Cem. Concr. Res.*, **9**, 4, 507-514 (1979).
3. G. Amato, G. Campione, L. Cavaleri, G. Minafò, The use of pumice lightweight concrete for masonry. *Materials and Structures*, **45**, 679–693 (2012).
4. J. Ameratunga, N. Sivakugan, B. M. Das, Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering, p. 228, Springer 2016.
5. M. Ameri, A. Behnood, Laboratory studies to investigate the properties of CIR mixes containing steel slag as a substitute for virgin aggregates. *Constr. Build. Mat.*, **26**, 1, 475-480 (2012).
6. M. K. Ankith, Self Curing Concrete with Light Weight Aggregate. *International Journal of Scientific Engineering and Research (IJSER)*, **3**, 7, 107-111 (2014).
7. ASTM, C., 128, Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate. American Society for Testing and Materials, Philadelphia 2007.
8. S. J. Bailey, N. C. Baldini, Annual book of ASTM standards, 11, 775-776, ASTM International, USA 2007.
9. S. Beck, Variations in the rupture mode of large earthquakes along the south american subduction zone, 59–62, Second ISAG 1993.
10. F. G. Bell, Engineering properties of soils and rocks, p. 256, Elsevier 2013.
11. D. P. Bentz, P. E. Stutzman., Curing, hydration, and microstructure of cement paste. *ACI materials journal*, **103**, 5, 348 (2006).
12. G. A. Boertje, Chemical and physical characteristics of pumice as a growing medium, In *International Symposium on Growing Media & Plant Nutrition in Horticulture*, 401, 85-88, 1994.
13. G. Campione, L. Cavaleri, G. Macaluso, G. Amato, F. Di Trapani, Evaluation of infilled frames: an updated in-plane-stiffness macro-model considering the effects of vertical loads. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **13**, 8, 2265-2281 (2015).
14. W. O. George, The relation of the physical properties of natural glasses to their chemical composition, *The Journal of Geology*, **32** 5, 353-372 (1924).
15. A. Giesecke, A. Gómez, I. Leschiutta, E. Migliorin, The ceresis earthquake catalogue and database of the andean region: background, characteristics and examples of use. *Annals of Geophysics*, **47**, 2/3, 421–435 (2004).
16. L. Gündüz, I. Ugur, The effects of different fine and coarse pumice aggregate/cement ratios on the structural concrete properties without using any admixtures, *Cem. Concr. Res.*, **35**, 9, 1859-1864 (2004).
17. K. M. A. Hossain, Properties of volcanic pumice based cement and lightweight concrete. *Cem. Concr. Res.*, **34**, 2, 83-291 (2004).
18. J. Jimenes Salas, J. De Justo, *Geotecnia y cimientos. Propiedades de los suelos y de las rocas, España: Rueda*, p. 498, Madrid, España 2001.
19. S. Kosmatka, M. L. Wilson, p. 520, *Design and Control of Concrete Mixtures*. Portland Cement Association; 16th edition, 2016.
20. K. Kovler, O. M. Jensen, Novel techniques for concrete curing, *Concrete International*, **27**, 09, 39-42 (2005).

4. Conclusions

Based on the results obtained it is possible to note that when replacing 100% of the conventional aggregate with pumice lightweight aggregate, the result is a lower-quality concrete, due to a 31% reduction of the compressive strength. The results demonstrate that the pumice may be used as a coarse aggregate for lightweight concrete thanks to the low density of pumice compared to the density of the conventional aggregate. This occurs as long as the structural load on the construction is low, such as rural single-family dwellings, as well as an aggregate in concrete to be used in subflooring where the service loads are minimal. Obviously, a further benefit and advantage results in the high abundance of the material, especially in volcano-surrounding areas.

The results of the absorption trials demonstrated that pumice, being a porous material, has the higher absorption than conventional aggregate, a fundamental factor that influences the mixture making process, due to the fact that the high amount of water temporarily absorbed has a direct influence on the range of the designed strengths.

Acknowledgments

The authors acknowledge the assistance in the laboratory by Ing. Juan Haro and are also thankful for the permits for sampling pumices given by the owners of the quarry in the Rumicucho sector, northern Quito. We also thank the Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE for logistic and financial support.

21. S. Kristiawan, Strength, Shrinkage and Creep of Concrete In Tension and Compression. *CED*, **8**, 2, 73-80 (2006).
22. P. Lura, D. P. Bentz, D. A., Lange, K. Kovler, A. Bentur, K. van Breugel, Measurement of water transport from saturated pumice aggregates to hardening cement paste. *Materials and Structures*, **39**, 9, 861-868 (2006).
23. P. L. Maier, S. A. Durham, Beneficial use of recycled materials in concrete mixtures. *Construction and Building Materials*, **29**, 428-437 (2012).
24. J. O. E. L. Manasseh, Use of crushed granite fine as replacement to river sand in concrete production. *Leonardo electronics journal of practice and technologies*, **17**, 85-96 (2010).
25. G. Mang'uriu, R. Mutku, W. Oyawa, S. Abuodha, Properties of Pumice Lightweight Aggregate. *Civil and Environmental Research*, **2**, 10, 58-67 (2012).
26. A. P. Martinez Ruiz, Factibilidad de uso de micropilotes construidos con piedra pomez de mala calidad. Factibilidad de uso de micropilotes construidos con piedra pomez de mala calidad, p. 228, Unpublished Thesis, Universidad de la Fuerzas Armadas ESPE, Sangolqui 2014.
27. P. K. Mehta, P. K. Mehta, *Concrete. Structure, properties and materials*, p. 450, Prentice-Hall 1986.
28. L. Minapu, M. Ratnam, U. Rangaraju, 2014: Experimental Study on Light Weight Aggregate Concrete with Pumice Stone, Silica Fume and Fly Ash as a Partial Replacement of Coarse Aggregate. *International Journal of Innovative Research in Science*, p. 18130-18138, Engineering and Technology, IJRSET, 2014.
29. L. J. Murdock, G. F. Blackledge, K. Brook, K. M. Brook, *Concrete materials and practice*, p. 444, Hodder Arnold 1979.
30. F. Pardo Casas, P. Molnar, Relative motion of the Nazca (Farallon) and South American plates since Late Cretaceous time. *Tectonics*, **6**, 3, 233-248 (1987).
31. T. Parhizkar, M. Najimi, A. R. Pourkhorshidi, Application of pumice aggregate in structural lightweight concrete. *Asian Journal of Civil Engineering*, **13**, 1, 43-54 (2012).
32. H. Parra, M. B. Benito, J. M. Gaspar-Escribano, Seismic hazard assessment in continental Ecuador. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1-31 (2016).
33. J. L. Pindell, S. F. Barrett, Geological evolution of the Caribbean region: a plate tectonic perspective. *The Caribbean region: Boulder, Colorado, Geological Society of America, Geology of North America*, v. H, 405-432, 1990.
34. L. Quintero Ortiz, J. Herrera, L. Corzo, J. Garcia, Relationship between the resistance to compression and the porosity of the concrete evaluated from ultrasonic parameters (in Spanish). *Revista ION*, **24**, 69-76, 2011.
35. V. Ramasamy, R. Muralitharan, Basic Properties of Pumice Aggregate. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, **VIII**, 4, 256-258 (2015).
36. M. Segura Castruita, C. Ortiz Solorio, M. Gutiérrez Castorena, Location of residual moisture soils from satellite images (In Spanish). *Tierra Latinoamericana*, **21**, 149-156 (2003).
37. C. Syverson, Market structure and productivity: A concrete example (No. w10501). National Bureau of Economic Research 2004.
38. D. Tiab, E. C. Donaldson, *Petrophysics: theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties*, p. 882, Gulf professional publishing 2015.
39. T. Toulkeridis, K. Chunga, W. Rentería, F. Rodriguez, F. Mato, S. Nikolaou, M. C. D'Howitt, D. Besenon, H. Ruiz, H. Parra, X. Vera-Grunauer, The 7.8 Mw earthquake and tsunami of 16th April 2016 in Ecuador: Seismic Evaluation, Geological Field Survey and Economic Implications. *Science of Tsunami Hazards*, **36**, 4, 197-242 (2017).
40. G. P. L. Walker, Plinian eruptions and their products. *Bulletin Volcanologique*, **44**, 3, 223-240 (1981).