



¹Faria, P., PhD, Associate Professor; Rui, P., MSc, Civil Engineer; CERIS and Department of Civil Engineering, NOVA University of Lisbon, Monte de Caparica, Portugal

NATURAL HYDRAULIC LIME (NHL 3.5) MORTARS WITH SCRAP TIRE RUBBER

¹Фариа П., канд. техн. наук, доцент; Руи П., магистр, инженер-строитель; ICIST, CERIS, факультет гражданского строительства, Университет NOVA, Лиссабон, Португалия

СУХИЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ СМЕСИ НА ОСНОВЕ ПРИРОДНОЙ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ИЗВЕСТИ (NHL 3.5) С ДОБАВКОЙ РЕЗИНОВОЙ КРОШКИ, ПОЛУЧЕННОЙ ИЗ ОТРАБОТАННЫХ ПОКРЫШЕК

Abstract

The use of wastes and industrial by-products as building materials is an important issue in order to decrease costs with waste management and the embodied energy of building products. In this study scrap tire rubber was used as additional aggregate of mortars based on natural hydraulic lime NHL 3.5 and natural sand. Different particle size fractions and proportions of scrap tire rubber were used: a mix obtained directly from industry and separated fine, medium and coarse fractions; 0%, 18%, 36% and 54% of the weight of binder, corresponding to 2.5%, 5% and 7.5% of the weight of sand. As mortars based on NHL specifications became stricter with the current version of EN 459-1:2015, the influence of the rubber's additions on the mortars' fresh state, mechanical and physical performance is presented in this work: flow table consistency, water retention, dynamic elasticity modulus, flexural and compressive strength, open porosity and bulk density, capillary absorption, drying and thermal conductivity are studied. The use of the rubber mix coming from the waste tire industry seems advantageous and may open possibilities for use as raw material by the mortars industry.

Key words: mortar; rubber; natural hydraulic lime; scrap tire rubber.

Introduction

The progress of technology brought to the society more requirements relative to living standards. Due to this improvement, there are direct environmental issues associated that did not exist a century ago. One of the biggest issues is the recycling of tires. This problematic is a big concern, because there are legal procedures that do not allow their fire burst in open air or its dump in landfills. Retreading companies try to avoid part of this problem, enlarging the life cycle of used tires, replacing

Аннотация

Использование отходов и побочных продуктов промышленности в качестве вторичного сырья для производства строительных материалов позволяет сократить материальные издержки и снизить затраты электроэнергии на их производство. В данной работе в качестве дополнительного заполнителя для составов на основе природной гидравлической извести (NHL 3.5) и кварцевого песка использовалась резиновая крошка (РК), полученная из отработанных автомобильных покрышек, а также ее отдельные фракции: мелкая, средняя и крупная. Смесь РК вводили в количестве 0; 18; 36 и 54% от массы вяжущего, что соответствовало 2,5; 5,0 и 7,5% от массы песка. Ввиду того, что с введением последней версии стандарта EN 459-1:2015 требования к параметрам NHL ужесточились, в работе изучено влияние содержания РК на механические и физические свойства растворной смеси и раствора: растекаемость, водоудерживающая способность, динамический модуль упругости, прочность при изгибе и сжатии, открытая пористость, средняя плотность, теплопроводность, капиллярное водопоглощение и высыхание. Использование смеси РК, полученной непосредственно с предприятий по переработке отработанных покрышек, является перспективным направлением и открывает новые возможности для производства строительных растворов.

Ключевые слова: строительный раствор; резиновая крошка; природная гидравлическая известь (NHL); резина из отработанных покрышек.

Введение

В результате технического прогресса качество жизни и потребности общества с каждым днем растут. В свою очередь, это ведет к возникновению экологических проблем, которые еще сто лет назад не были

the used tire tread for a new one. However, this procedure leads to another one: what to do with the scrap tire rubber waste? These companies agglomerate the waste and have very little use to it [1]. In recent years, the construction field tried to apply this waste in various manners, such as pavements (artificial turfs or roads), cementitious mortars [2] and concrete mixes [3]. Studies performed on scrap tire rubber concluded that the rubber is an elastic waste that can provide some deformability and improve thermal characteristics to cement-based mortars, although the mechanical characteristics could be compromised [4].

Natural hydraulic limes (NHL) are natural binders with particular characteristics of both air and hydraulic binders, that can be very beneficial in several types of application, namely when applied on the rehabilitation of buildings. NHL specifications became stricter with the last version of EN 459-1 [5] and some previously named NHL have been reclassified as natural lime HL. EN 459-1 NHL are only produced in few countries of the world, namely in Portugal. Because of the previous reasons the study of the properties of natural hydraulic lime NHL 3.5 mortars have recently regain the interest of the scientific community [6].

Very few studies address the characterization of mortars with scrap tire rubber and the majority of them characterize cement-based mortars. The present study addresses the mechanical and hygrothermal characteristics of natural hydraulic lime mortars with scrap tire rubber as additional aggregate. The mechanical tests undertaken are the elasticity modulus, compressive and flexural strength, while hygrothermal tests done are thermal conductivity, capillary absorption and drying. All of the mortars were prepared in laboratory, and used the same type and proportions of NHL and sand, even though the size and proportion of the added scrap tire rubber changed.

1. Materials, mortars and samples

It was initially defined that the mortars would only contain natural hydraulic lime, siliceous sand and scrap tire rubber waste, in addition to the mix of NHL and sand. No admixtures were used. The binder used was a natural hydraulic lime NHL 3.5 produced by SECIL Argamassas company and will be named NHL. Their chemical characterization has been published elsewhere [7] and the loose bulk density is presented in **Table 1**. The sand used was a mix of four different natural siliceous sands with variable particle size, to achieve a particle size distribution that can be observed in **Fig. 1**. The loose bulk density of the sand is presented in **Table 1**. The scrap tire rubber waste was provided by the retreading company BANDAGUE. Since the rubber

актуальны. Одной из острых проблем является переработка автомобильных покрышек, так как действующее законодательство запрещает их сжигание на открытом воздухе или складирование на свалках. Компании, специализирующиеся на восстановлении покрышек, предпринимают попытки частично решить данную проблему за счет продления срока службы использованных шин, заменяя изношенные протекторы покрышек на новые; однако в связи с таким подходом возникает новый вопрос: что делать с резиновыми отходами от уже отработанных покрышек? Компании накапливают отходы, которые практически не используются [1]. В последние годы РК, полученную из отходов, пытались применять в строительной отрасли, например, для создания дорожных покрытий (искусственных покрытий или дорог), цементных растворов [2] и бетонных смесей [3]. Исследования РК, полученной из отработанных покрышек, показали, что она повышает деформативность, улучшает теплофизические показатели цементных растворов, но при этом их механические показатели снижаются [4].

Природная гидравлическая известь (NHL) является природным вяжущим материалом, которому присущи определенные свойства как воздушных, так и гидравлических вяжущих веществ, что имеет большое практическое значение, например, при реставрации зданий. Требования к техническим показателям NHL ужесточились с появлением последней редакции стандарта EN 459-1 [5]: некоторые материалы, которые ранее были отнесены к группе NHL, теперь переклассифицированы как гидравлическая известь NHL, соответствующая стандарту EN 459-1, производится только в нескольких странах мира, в частности в Португалии. В силу изложенных выше причин научное сообщество вновь заинтересовалось исследованиями растворов на основе NHL 3.5 [6].

В большинстве работ изучались цементные растворы, и лишь в единичных работах предпринимались попытки исследовать показатели строительных растворов с добавкой РК, полученной из отработанных покрышек. В данном исследовании особое внимание уделяется механическим и теплофизическим показателям строительных растворов на основе NHL с использованием в качестве дополнительного заполнителя РК. Исследовались следующие механические показатели: модуль упругости, прочность при изгибе и сжатии, а также теплофизические параметры теплопроводности, капиллярного водопоглощения и высыхания. Все строительные растворы были изготовлены в лабораторных условиях с использованием природной извести и кварцевого песка одного и того же состава. Соотношение вяжущего и песка в растворной смеси сохранялось постоянным, изменялись лишь содержание и гранулометрический состав РК.

Table 1. Loose bulk density of the mortar's components
Таблица 1. Насыпная плотность компонентов раствора

Material // Материал	NHL // Природная гидравлическая известь	Sand // Песок	Фракция MIXr	Cr	Mr	Fr
Loose bulk density, kg/m ³ // Насыпная плотность, кг/м ³	688	1643	352	289	341	286

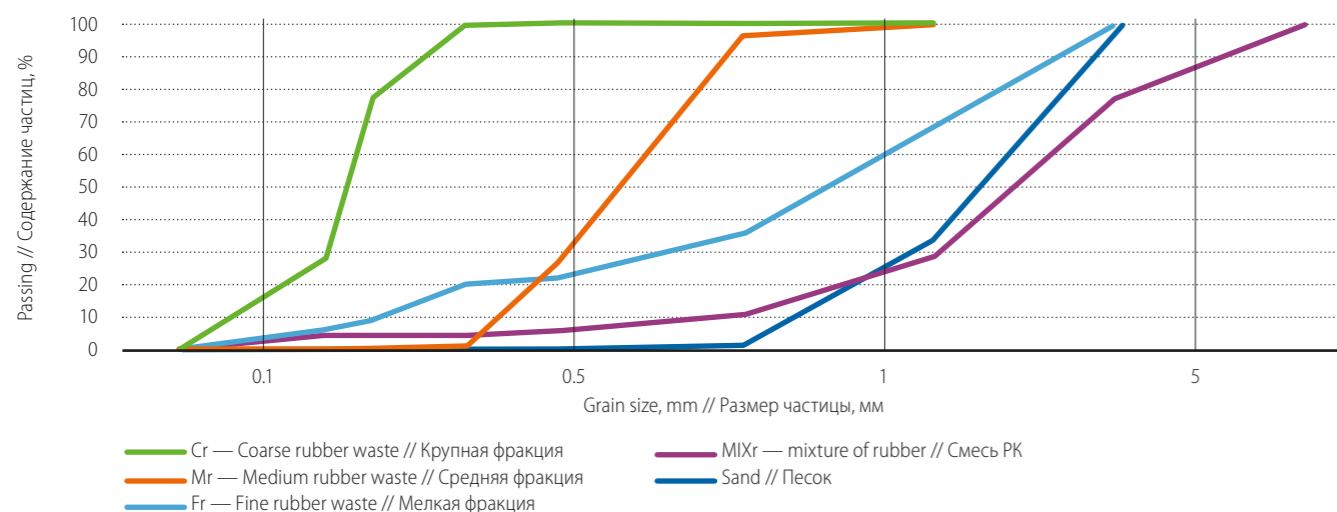


Fig. 1. Particle size distribution of the sand and the scrap tire waste fractions
Рис. 1. Интегральные кривые распределения частиц по размерам РК

waste had different sizes and forms, it was previously sieved and only the particles below 2.36 mm were used. The remaining rubber waste was abdicated in this stage of the study because of the small size of the samples to be prepared and tested. The particle size distribution of the rubber waste fraction below 2.36 mm (designated as MIXr) was performed and can be observed in Fig. 1. With the results of the particle size distribution of the rubber waste, it was decided also to divide it into the following groups:

- ▷ coarse rubber waste, Cr, which includes the particles under 2.36 mm and above 0.6 mm;
- ▷ medium rubber waste, Mr, with particles between 0.6mm and 0.212 mm;
- ▷ fine rubber waste, Fr, with particles under 0.212 mm.

From the global sample MIXr the percentage of each fraction was 1.5% of Fr, 27.5% of Mr and 71% of Cr. The dosage of each fraction when the mixture of rubber MIXr was used was calculated according to these percentages. The loose bulk density of each type of rubber waste is presented in Table 1. The MIXr was added to the mortar's formulation on percentages of 0% (reference mortar), 18%, 36% and 54% of NHL weight, corresponding to 2.5%, 5% and 7.5% of the weight of the sand. Other mortars formulations had an addition of 36% of the NHL weight (5% of the sand weight) of only the Fr, Mr and Cr fractions of the rubber waste.

All the mortars were made in laboratory, with a 1:3 (NHL: sand) volumetric proportion. Water was added to ensure a good workability. The weight proportions of all the mortars are shown in Table 2. Mortars are named as Reference (0% rubber waste) and by the type (MIX, Cr, Mr or Fr) and proportion (2.5%, 5% or 7.5% of the sand's weight) of rubber waste that has been added.

The production of the mortars was based on EN 1015-11 [8], but with some particularities that has been

1. Материалы, строительные растворы и образцы

В базовый состав растворной смеси, вводили РК, полученную из отработанных покрышек, входили только NHL и кварцевый песок. Никакие другие добавки не применялись. В качестве вяжущего использовалась NHL (NHL 3.5) производителя компании «SECIL Argamassas». Химические показатели извести представлены в работе [7], насыпная плотность указана в табл. 1. Для получения заполнителя с требуемым гранулометрическим составом, представленным на рис. 1, использовалась смесь четырех видов кварцевого песка с различным фракционным составом. Насыпная плотность песка приведена в табл. 1. Резиновая крошка, полученная из отработанных покрышек, была предоставлена компанией «BANDAGUE», специализирующейся на восстановлении шин. Исходная смесь РК, состоявшая из отличающихся по форме и размеру частиц, была просеяна с выделением фракции 0–2,36 мм. Более крупная фракция была исключена, поскольку в исследовании использовались образцы малого размера. Гранулометрический состав РК с фракцией менее 2,36 мм (далее фракция MIXr) представлен на рис. 1. В соответствии с этим фракционным составом было решено разделить MIXr на следующие группы:

- ▷ крупная фракция РК, Cr, с частицами размером от 0,6 до 2,36 мм;
- ▷ средняя фракция РК, Mr, с частицами размером от 0,212 до 0,6 мм;
- ▷ мелкая фракция РК, Fr, с частицами размером менее 0,212 мм.

Процентное содержание этих фракций в MIXr составило: 1,5% — мелкая фракция Fr, 27,5% — средняя фракция Mr и 71% — крупная фракция Cr. При использовании MIXr содержание каждой

used currently in the laboratory of NOVA University of Lisbon. The process was made by initial manual homogenization of the dry components, water addition during the first seconds of mechanical mixing. After two and a half minutes of the mechanical mixing, the mortar on the borders of the ball was incorporated during a stop of 30 seconds, and the mortar was finished after a last period of 30 seconds of mechanical mixing. After this process, the fresh state characterization was made and two types of samples were produced: cylindrical samples, with 90 mm of diameter and 20 mm high, and prismatic samples with 40 × 40 × 160 mm. The samples were let dry in stable laboratory conditions (20 ± 3 °C of temperature and 65 ± 5% of relative humidity) during 28 days.

2. Methods and analysis of results

2.1 Fresh state characterization

The characterization of the mortars in the fresh state included the experiments of consistency by flow table test, based on EN 1015-3 [9], density, based on EN 1015-6 [10], and water retention test, based on EN 1015-8 [11]. Results are shown in Table 3.

The flow table consistency results do not differ very much because the quantity of added water was defined to achieve good workability; 170 ± 2.5 mm was obtained as average and standard deviation between all mortars. Comparing with the water/NHL ratio from Table 2 it can be noticed that the addition of all the types of rubber waste slightly increased the added water to maintain workability. When using MIXr increased proportion of rubber waste addition needed more water to maintain workability. The use of the fine fraction of the waste, Fr, also needed an increase in water addition. Although the proportion of NHL and sand was always the same in all mortars, the addition of rubber waste occupies different volumes, conducting to different quantities of binder: sand paste. It can be noticed that the bulk density decreases with the percentage of MIXr, as well as with the fineness of the rubber waste fraction. In terms of water retention it seems that it decreases with the addition of the coarse fraction of rubber waste, being similar to the reference mortar with all the other additions.

Table 2. Weight proportion of the mortars and water/NHL ratio

Таблица 2. Состав растворных смесей (по массе) и соотношение вода/известь

Mortar // Обозначение растворной смеси	NHL // Природная гидравлическая известь	Sand // Песок	Scrap tire rubber // РК из отработанных автомобильных покрышек				Water/NHL // Соотношение вода/известь
			Fr	Mr	Cr	MIXr	
Ref // Эталон	1	7,2	—	—	—	—	1,2
MIXr_2,5	1	7,2	—	—	—	0,2	1,3
MIXr_5	1	7,2	—	—	—	0,4	1,3
MIXr_7,5	1	7,2	—	—	—	0,5	1,4
Cr_5	1	7,2	—	—	0,4	—	1,3
Mr_5	1	7,2	—	0,4	—	—	1,3
Fr_5	1	7,2	0,4	—	—	—	1,5

фракции было рассчитано в соответствии с данным процентным распределением. Насыпная плотность каждого типа РК приведена в табл. 1. Фракция MIXr вводилась в растворную смесь в следующем соотношении: 0 (эталонный раствор), 18, 36 и 54% от массы NHL, что соответствует 2,5; 5,0 и 7,5% от массы песка. В другие составы растворных смесей по отдельности вводилась крупная, средняя и мелкая фракции РК по 36% от массы NHL (5% от массы песка).

Изготовление растворных смесей производили в лаборатории при соотношении NHL и песка 1:3 по объему. Для обеспечения требуемой удобоукладываемости вводилась вода. Состав растворной смеси (по массе) приведен в табл. 2. Растворам были присвоены следующие обозначения: эталонный (0% РК) и в соответствии с фракцией, вводимой РК: MIXr, Cr — крупная, Mr — средняя или Fr — мелкая фракция с учетом процентного содержания вводимой РК: 2,5; 5,0 и 7,5% от массы песка.

Растворные смеси изготавливались в лаборатории Университета NOVA в Лиссабоне в соответствии со стандартом EN 1015-11 [8], однако с некоторыми особенностями. Компоненты сухих смесей вначале смешивались вручную, после чего в первые секунды механического перемешивания вводилась вода. Через 2,5 мин. остатки растворной смеси счищались со стенок в течение 30 сек., затем смесь снова перемешивалась 30 сек. После этого определялись показатели растворной смеси и изготавливались два вида образцов: образцы-цилиндры диаметром 90 мм и высотой 20 мм и образцы-балочки 40 × 40 × 160 мм. Затем образцы высушивались при температуре 20 ± 3 °C и относительной влажности 65 ± 5% в течение 28 сут.

2. Методики и анализ результатов

2.1 Определение показателей растворной смеси

Для определения показателей растворной смеси были проведены испытания на растекаемость в соответствии со стандартом EN 1015-3 [9], плотности — по EN 1015-6 [10] и водоудерживающей способности — по EN 1015-8 [11]. Результаты представлены в табл. 3.

2.2 Mechanical characterization

To evaluate the mechanical characteristics of the mortars, a testing campaign was performed with three samples from each mortar after 28 days of curing. This campaign involved the dynamic elasticity modulus, based on EN 14146 [12], flexural and compressive strength, based on EN 1015–11 [8] and results can be observed in **Fig. 2**. It is possible to observe that the addition of rubber wastes decreases the mechanical properties.

Flexural strength decreases with the increment of rubber percentage, and also decreases with the decrease of particles size. The difference when adding 5% of MIX or Cr is very small. Analyzing the compressive strength, it is not possible to make a conclusion relating it with the percentage of the rubber added to the mortars, as there is a strange non-linear relation. In fact the higher Cs was presented by the mortar with 5% of MIXr (MIX_5). On the contrary, the compressive strength decreases with the decrease of the particle size of the rubber waste.

As for the dynamic elasticity modulus, it decreases with the increase of the percentage of added rubber, and also with the decrease of the particle size of that waste, similarly to what happened with the flexural strength. The dynamic elasticity modulus of mortars MIXr and Mr are quite comparable. Considering that a high flexural strength and a low dynamic elasticity modulus would be advantageous to assure deformability and resistance to cracking, it can be seen in **Fig. 3** that the mortar MIX_5 (which also presented the higher compressive strength among the ones with rubber waste) registered the highest ratio Fs/Ed.

2.3 Open porosity and hardened bulk density

For better understanding of the mortars, their open porosity and the hardened state bulk density were

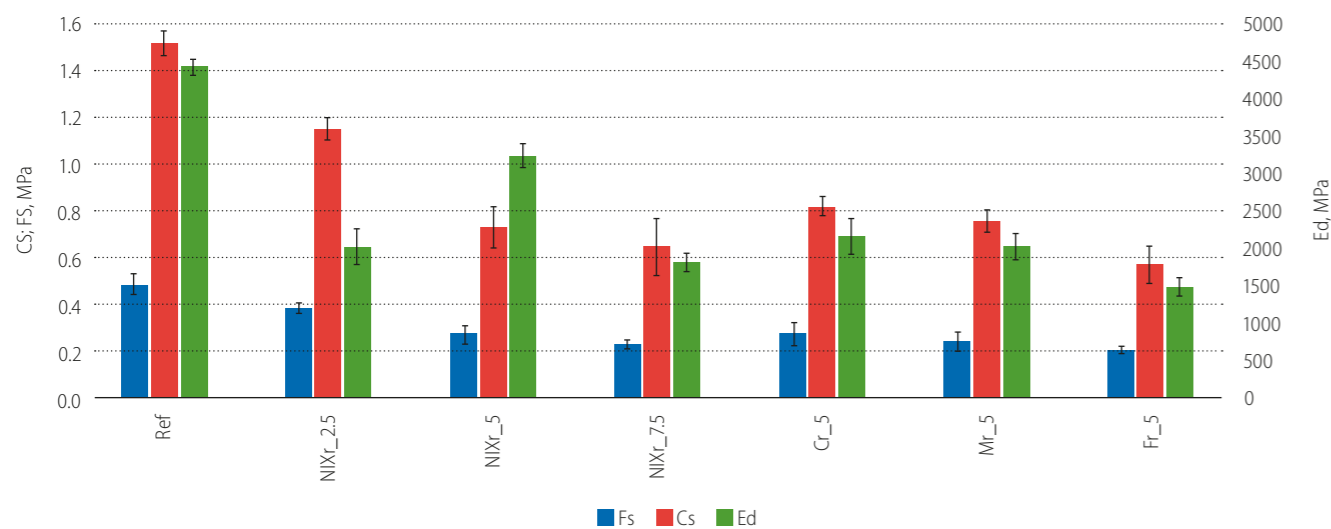


Fig. 2. Flexural strength Fs, compressive strength Cs and dynamic elasticity modulus Ed at 28 days
Рис. 2. Прочность при изгибе (Fs), прочность при сжатии (Cs) и динамический модуль упругости (Ed) растворов в возрасте 28 сут.

Table 3. Fresh state characterization of mortars
Таблица 3. Показатели растворовных смесей

Mortar // Растворная смесь	Flow, mm // Растекаемость, мм	Density, kg/m³ // Плотность, кг/м³	Water retention, % // Водоудерживающая способность, %
Ref // Эталон	166	2073	85,4
MIXr_2.5	172	1947	86,8
MIXr_5	167	1863	86,1
MIXr_7.5	170	1816	85,8
Cr_5	171	1906	83,1
Mr_5	173	1834	85,9
Fr_5	169	1807	86,7

Результаты испытаний на растекаемость отличались друг от друга незначительно, так как количество воды затворения было рассчитано с учетом обеспечения заданной удобоукладываемости; среднее значение составило $170 \pm 2,5$ мм со стандартным отклонением по всем составам. Сравнивая полученные результаты с отношением вода/NHL, представленным в **табл. 2**, можно отметить, что при введении РК всех исследованных фракций требовалось незначительное увеличение водопотребности смеси для сохранения необходимой удобоукладываемости. Так, даже при увеличении содержания РК фракции MIXr для обеспечения удобоукладываемости растворной смеси требовалось повысить расход воды. Такая же ситуация наблюдалась в составах с мелкой фракцией Fr. При этом средняя плотность снижалась как при введении MIXr, так и при использовании более мелкой фракции. Несмотря на то, что при изготовлении образцов соотношение NHL и песка оставалось неизменным для всех составов, при введении РК происходило замещение определенного объема, что приводило к изменению соотношения вяжущее/заполнитель. Водоудерживающая способность снижалась только при введении крупной фракции РК, для других

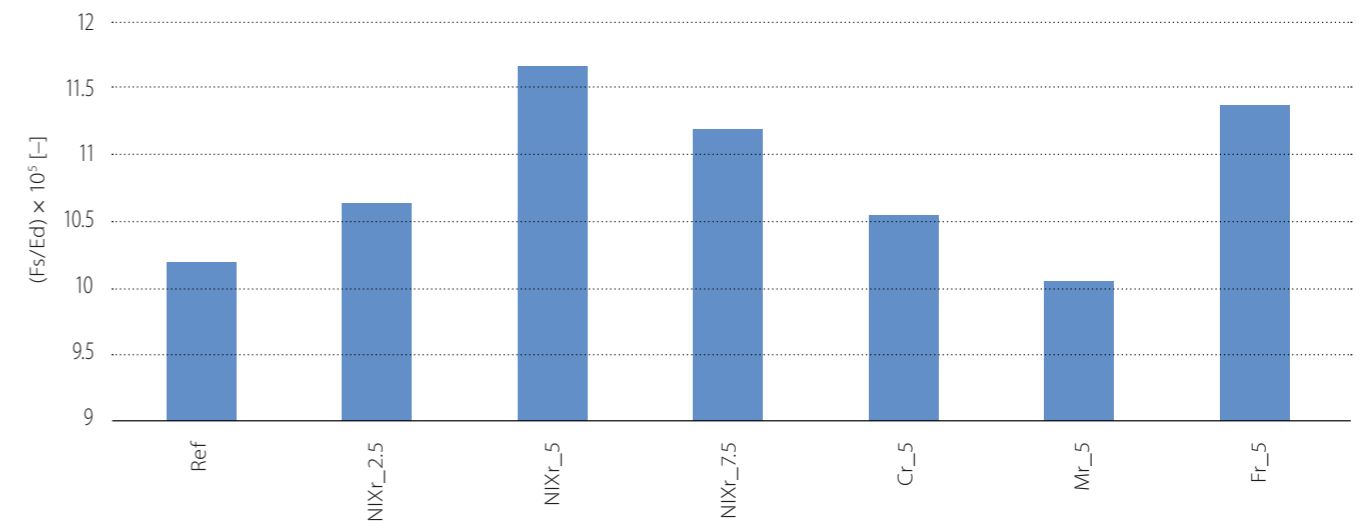


Fig. 3. Flexural strength/dynamic elasticity modulus ratio at 28 days
Рис. 3. Отношение прочности при изгибе к модулю динамической упругости раствора в возрасте 28 сут.

determined by vacuum and hydrostatic weighting, based on EN 1936 [13]. Results are shown in **Table 4**.

The open porosity does not change too much, increasing only 1–2%. Nevertheless it can be observed that the addition of rubber waste generally increases the porosity. The results of the bulk density in the hardened state are similar to the ones obtained from the fresh state. This means that the bulk density decreases with the increasing amount of rubber in the mortars and also with the decreasing size of the particles.

2.4 Capillary absorption and drying

Capillary absorption experiment was based on EN 15801 [14] and EN 1015–18 [15]. The prismatic samples were cut down to cubes with 40 mm edges. To ensure waterproof in the lateral faces, they were covered with an epoxy resin. The results are expressed by capillary curves, with the capillary absorption function of the square root of time, which allow the determination of capillary coefficients, calculated by the slope of the more representative initial segment of the curve, and the asymptotic value of capillary. The capillary curves are presented in **Table 5**.

The mortars with MIXr present a lower capillary coefficient than the ones with only one fraction of rubber and even lower than the reference mortar, what is very positive. The tendency is a decrease on the capillary coefficient with the MIXr addition and with the decrease of particle size of the waste. The MIXr_5 mortar presents the lowest capillary coefficient, very close to the MIX_7.5 mortar. As for the capillary water absorption, MIXr_5 present the lowest asymptotic, close to the Ref mortar, while all the others present higher capillary water absorption. Although MIXr mortar absorb a total quantity of water that is similar to the reference mortar, mortars with

составов этот показатель близок к показателям эталонного раствора.

2.2 Определение механических показателей

Для определения механических показателей испытывались по три образца от каждого состава в возрасте 28 суток. В данной серии испытаний определялся динамический модуль упругости в соответствии со стандартом EN 14146 [12], а также прочности при изгибе и сжатии по EN 1015–11 [8], результаты испытаний представлены на **рис. 2**. Анализ результатов показал, что при введении РК происходит снижение механических показателей раствора.

Прочность при изгибе снижается по мере увеличения содержания РК, а также при уменьшении размеров частиц. У растворов с 5% MIXr_5 и крупной фракцией РК (Cr_5) прочность изменилась незначительно. Анализ прочностных показателей при сжатии показал, что невозможно сделать однозначный вывод, зависит ли этот показатель от содержания РК, поскольку наблюдается странная нелинейная зависимость. Так, более высокая прочность при сжатии была достигнута при введении 5% MIXr_5 по сравнению с Cr_5. И наоборот, прочность при сжатии снижается с уменьшением размера частиц РК.

Динамический модуль упругости снижается с увеличением содержания РК, а также с уменьшением размера частиц, так же, как и прочность при изгибе. Величина динамического модуля упругости растворов при введении MIXr и средней фракции Mr сопоставимы. Следует учесть, что высокая прочность при изгибе и низкое значение динамического модуля упругости способствуют повышению деформативности и трещиностойкости. На **рис. 3** показано, что образец раствора с MIX_5 (который обладает

separated fractions of waste absorbs a higher amount of water. This factor increases as the particle size decreases.

The drying capacity experiment started when the capillary absorption test finished, with the same samples with the exception they were wrapped in cling film in the lower base. The wrapped was made with a rubber band. This test was based on EN 16322 [16]. The initial parts of the drying curves are presented in Fig. 5.

The drying rate, DR, represents the initial drying speed calculated by the slope of the initial segment of each drying curve, and the drying index, DI, representing how hard for each mortar is to achieve a complete dry equilibrium. Drying index was determined at 700 h of test, when the percentage of moisture was in equilibrium with the environment, and a simplified expression was used [7]. Both are presented in Table 5. All the mortars present a higher DR than Ref mortar. This means that a fast drying occur what, particularly in singular fraction waste mortars, would compensate a fast absorption on mortars with added rubber. Mortars Cr_5 and MIXr_5 present the highest DR. The drying index values are all very similar, although they are all higher than the Ref mortar, indicating a lower total drying capacity. DI increases with the addition of rubber waste and with the decrease on the particle size of the waste.

2.5 Thermal Conductivity

This experiment was performed on the cylindrical samples with 90 mm diameter and 20 mm high. A Heat Transfer Analyzer Isomet 2104 equipment was used to estimate the thermal conductivity of the mortars, with a circular 60 mm probe. Results are presented in Fig. 6.

As the percentage of rubber waste increases, the thermal conductivity decreases and it decreases also with

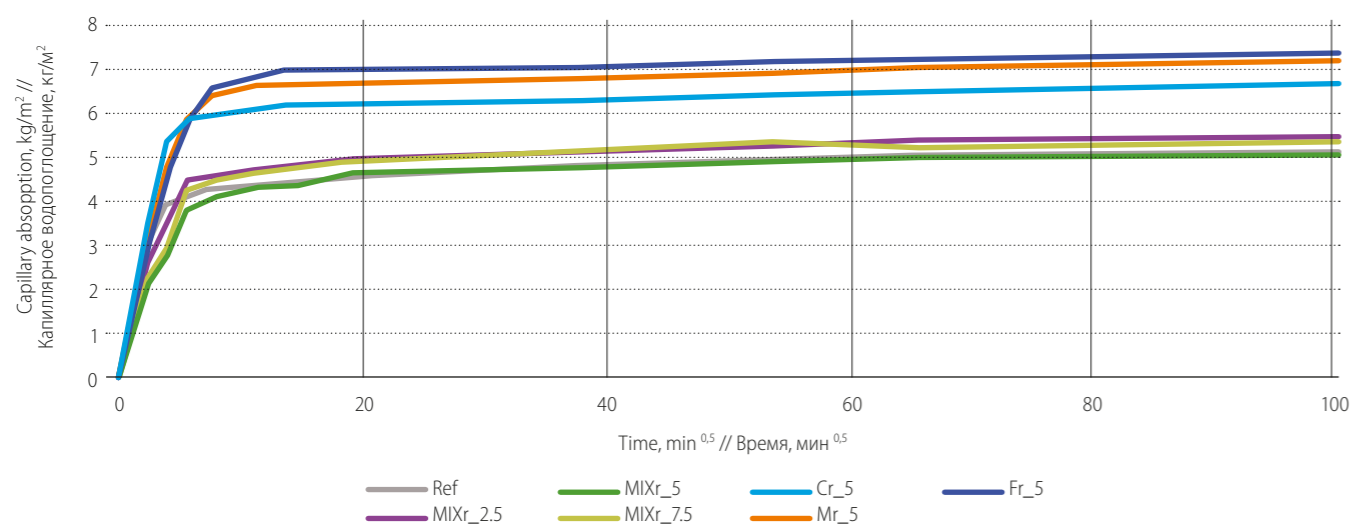


Fig. 4. Capillary water absorption curves at 28 days
Рис. 4. Кривые капиллярного водопоглощения раствора в возрасте 28 сут.

Table 4. Open porosity and bulk density after 28 days
Таблица 4. Открытая пористость и средняя плотность раствора в возрасте 28 сут.

Mortar // Раствор	Porosity, % // Пористость, %		Density, kg/m³ // Плотность, кг/м³	
	Average // Средняя	StDv // Ст. откл.	Average // Средняя	StDv // Ст. откл.
Ref // Эталон	21,9	0,3	1924	4
MIXr_2.5	21,7	0,3	1788	12
MIXr_5	23,2	0,9	1657	52
MIXr_7.5	23,2	0,4	1653	6
Cr_5	23,4	0,6	1737	28
Mr_5	23,1	0,4	1709	9
Fr_5	23,3	0,3	1645	7

наибольшей прочностью при сжатии из всех испытанных образцов с РК) характеризуется самым высоким отношением прочности при изгибе к динамическому модулю упругости (Fs/Ed).

2.3 Открытая пористость и средняя плотность растворов

Для лучшего понимания процессов, происходящих в строительных растворах, методом вакуумного и гидростатического взвешивания в соответствии со стандартом EN 1936 [13] были определены открытая пористость и средняя плотность. Результаты представлены в табл. 4.

Практически у всех составов с РК открытая пористость увеличивалась незначительно (на 1–2%). Показатели средней плотности раствора соответствовали показателям плотности растворной смеси. Это означает, что средняя плотность строительных

Table 5. Capillary coefficients CC, asymptotic value of capillary AV, drying rate DR and drying index DI at 28 days (average and standard deviation)

Таблица 5. Коэффициенты капиллярного водопоглощения, капиллярное водопоглощение (AV), скорость (DR) и коэффициент высыхания (DI) в возрасте 28 сут. (среднее значение ± стандартное отклонение)

Mortar // Раствор	Capillary coefficients, kg/(m²·min ^{0.5}) // Коэффициенты капиллярного водопоглощения, кг/(м²·мин ^{0.5})	AV, kg/m² // Капиллярное водопоглощение, кг/м²	DR, kg/(m²·h) // Скорость высыхания, кг/(м²·ч)	DI // Коэффициент высыхания
Ref // Эталон	1,05 ±0,11	5,2 ±0,5	0,101 ±0,015	0,021 ±0,002
MIXr_2.5	0,84 ±0,09	5,5 ±0,4	0,107 ±0,011	0,023 ±0,007
MIXr_5	0,72 ±0,12	5,1 ±0,8	0,128 ±0,011	0,025 ±0,005
MIXr_7.5	0,76 ±0,04	5,4 ±0,8	0,120 ±0,014	0,031 ±0,005
Cr_5	1,34 ±0,11	6,7 ±0,8	0,137 ±0,025	0,037 ±0,004
Mr_5	1,09 ±0,05	7,2 ±0,7	0,106 ±0,012	0,038 ±0,002
Fr_5	1,08 ±0,04	7,4 ±0,8	0,105 ±0,018	0,042 ±0,002

the decrease of rubber waste size fraction. The tendency is exactly the same that had previously been detected for the bulk density.

Conclusions

Based on the experimental campaign that has been presented it is possible to conclude that:

- It was possible to formulate mortars with good workability with the addition of different proportions and different particle size fractions of scrap tire rubber waste; nevertheless, the introduction of the rubber waste leads to the need of more water/NHL ratio to maintain that level of workability.
- All the mortars with waste rubber addition are lighter than the reference mortar, which justifies the decrease of bulk density; that is due to the fact that the volumes of rubber wastes (with low loose bulk density when compared to the sand and even to the NHL) is not occupied by the binder: sand paste.
- The introduction of scrap tire rubber wastes causes a significant decrease in mechanical characteristics of mortars, namely compression and flexural strengths and dynamic elasticity modulus; nevertheless the compressive strength of mortar with 5% of MIXr is higher than 1 MPa.
- Although the decrease on mechanical characteristics with the addition of rubber waste, the dynamic elasticity modulus decrease means that the mortars are more deformable; and in fact, the flexural strength/dynamic elasticity modulus ratio is very positive for most of the mortars with rubber waste and particularly for the mortar with 5% of MIXr.
- Open porosity is slightly higher (up to 2%), which means that the introduction of rubber waste may induce more or bigger pores; that fact should be further investigated analyzing the rubber and the rubber-mortars microstructure.
- Mortars with addition of MIXr have lower capillary coefficients than the reference mortar, and particularly the mortar with 5% of MIXr present

растворов снижается с увеличением содержания РК и с уменьшением размера ее частиц.

2.4 Капиллярное водопоглощение и высыхание

Определение капиллярного водопоглощения проводили по EN 15801 [14] и EN 1015–18 [15]. Из образцов-балочек были вырезаны кубы с размерами 40 × 40 × 40 мм. Для обеспечения водонепроницаемости боковых граней их изолировали эпоксидным составом. Полученные результаты представлены в виде кривых, где капиллярное водопоглощение является функцией квадратного корня от времени, что позволяет определить коэффициенты капиллярного водопоглощения, которые рассчитываются по типичному наклону начального участка кривой и максимальному значению капиллярного водопоглощения. Кривые капиллярного водопоглощения представлены на рис. 4, а коэффициенты капиллярного водопоглощения — в табл. 5.

Коэффициент капиллярного водопоглощения составов с РК фракции MIXr ниже, чем у растворов с узкой фракцией РК, и даже ниже, чем у эталонного состава, что является положительным фактором. Как правило, коэффициент капиллярного водопоглощения снижается с повышением содержания РК и с уменьшением размера ее частиц. Раствор MIXr_5 обладает самым низким коэффициентом капиллярного водопоглощения, его величина близка к показателю раствора MIX_7.5. Капиллярное водопоглощение раствора MIXr_5 имеет минимальное значение, близкое к эталонному раствору, в то время как для всех остальных растворов отмечены более высокие значения. Хотя строительный раствор с РК MIXr имеет такое же водопоглощение, как и эталонный раствор, у растворов с отдельными фракциями РК этот показатель значительно выше. Данный параметр увеличивается по мере уменьшения размера частиц.

Исследование высыхания проводили после определения капиллярного водопоглощения с использованием тех же образцов, с тем лишь исключением, что их нижнее основание было изолировано

a slow capillary absorption; also this fact can find explanation on the rubber-mortar microstructure. Mortars with separate fractions of rubber waste are not so positive in terms of velocity and total absorption of capillary.

- ▷ All the mortars with addition of rubber waste present a faster initial drying than the reference mortar, what would contribute for an easy evaporation of the absorbed water.
- ▷ The thermal conductivity decreases with the addition of rubber waste showing the same trend of bulk density.

In face of the results, it seems that the use of the rubber MIX waste coming from the scrap tire industry seems advantageous and may open possibilities for use as raw material by the mortars industry. The addition of 5% of the sand weight seems particularly promising. Further characterization of the rubber waste mortars is going on, namely in terms of microstructure and destruction by chemical leaching. This last characterization, together with already obtained results, will allow defining possibilities of application, for instance as based layers of renders and plasters, as masonry mortars or as intermediate screeds. Bearing in mind the type of applications and the requirements that are defined by standards [17, 18], the formulations would be further optimized.

Acknowledgments

Acknowledgments are due to Vitor Silva for helping in the experimental campaign, to BANDAGUE Lda for the scrap tire waste and to SECIL Argamassas company for the NHL 3.5. The general content of this research was first presented in the EMO Summit 2015.

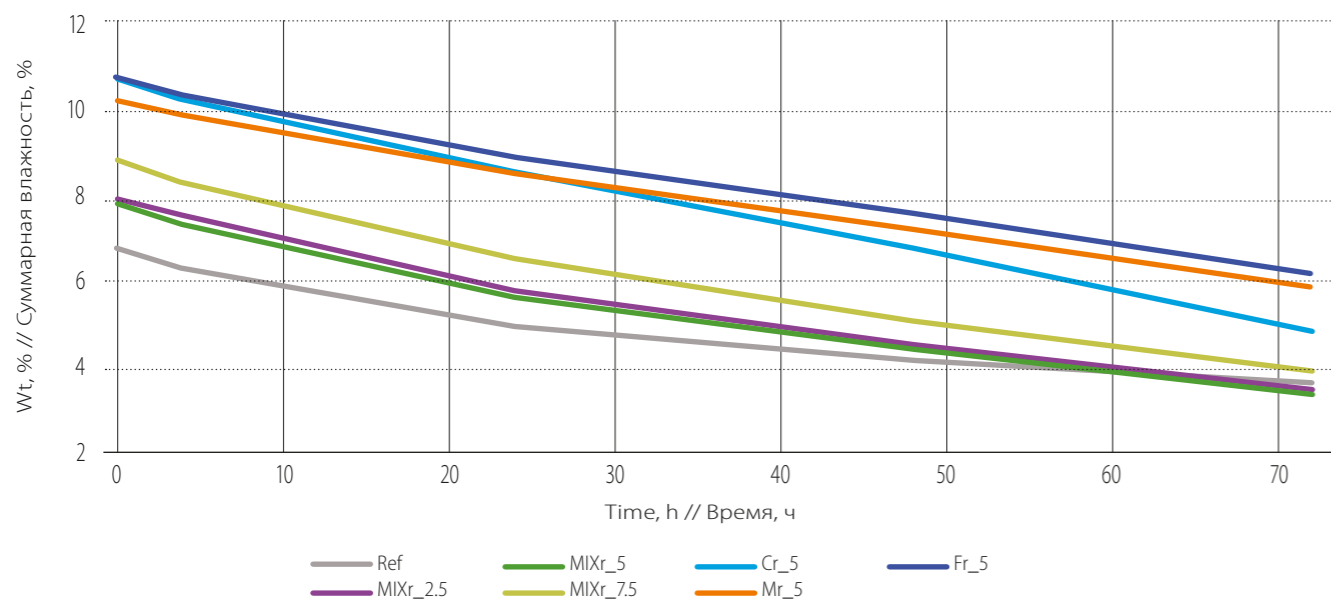


Fig. 5. Drying curves of mortars after capillary absorption

Рис. 5. Кривые высыхания строительных растворов после капиллярного водопоглощения

резиновой лентой. Испытания проводились в соответствии со стандартом EN 16322 [16]. Начальные участки кривых высыхания представлены на рис. 5.

Скорость высыхания (DR) отражает начальную скорость сушки, вычисленную по наклону начального участка каждой кривой, а коэффициент высыхания (DI) показывает, как раствор высыхает. Коэффициент высыхания определяли после 700 ч сушки образцов, в момент, когда влажность раствора соответствовала влажности окружающей среды, для его расчета использовалось упрощенное уравнение [7]. Результаты испытаний представлены в табл. 5. Все растворы с РК характеризуются более высокой скоростью высыхания, чем эталонный раствор. Самую высокую скорость высыхания имели растворы с Cr_5 и MIXr_5. Коэффициенты высыхания DI имеют близкие значения, при этом они выше, чем у эталонного раствора, что указывает на снижение способности к высыханию. Коэффициент высыхания растет с увеличением содержания РК и уменьшением размера частиц РК.

2.5 Теплопроводность

Испытания проводили на образцах-цилиндрах диаметром 90 мм и высотой 20 мм. Для определения теплопроводности строительных растворов использовался анализатор теплопередачи Isomet 2104 с круглым зондом диаметром 60 мм. Результаты представлены на рис. 6.

Теплопроводность раствора снижается с увеличением содержания РК, а также с уменьшением размера фракции. Тенденция абсолютно идентична результатам по средней плотности.

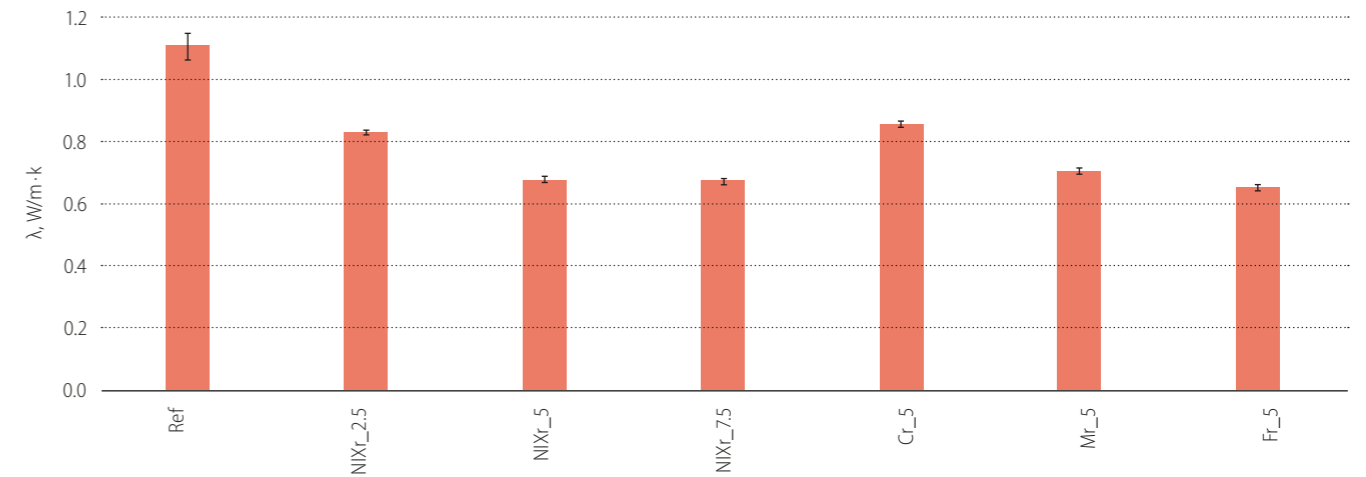


Fig. 6. Thermal conductivity of mortars at 28 days

Рис. 6. Теплопроводность растворов в возрасте 28 сут.

References // Литература

1. AAVV (2007), Relatório temático sobre o resultado das inspeções a indústrias de reconstrução de pneus, levado a cabo pela Inspeção — Geral do Ambiente e do Ordenamento do Território. Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional.
2. Eiras, J., Segovia, F., Borrachero, M., Monzó, J., Bonilla, M., Payá, J. (2014). Physical and mechanical properties of foamed Portland cement composite containing crumb rubber from worn tires. *Materials and Design* 59. P. 550–557.
3. Thomas, B., Gupta, R., Kalla, P., Cseteneyi, L. (2014). Strength, abrasion and permeation characteristics of cement concrete containing discarded rubber fine aggregates. *Construction and Building Materials* 59. P. 204–212.
4. Al-Ahkras, N., Smadi, M. (2004). Properties of tire rubber ash mortar. *Cement & Concrete Composites* 26. P. 821–826.
5. CEN (2015), EN 459–1:2015. Building lime. Definitions, specifications and conformity criteria. Brussels.
6. Grilo, J., Faria, P., Veiga, R., Santos-Silva, A., Silva, V., Velosa, A. (2014b). New natural hydraulic lime mortars Physical and microstructural properties in different curing conditions. *Construction and Building Materials* 54. P. 378–384.
7. Grilo, J., Santos-Silva, A., Faria, P., Gameiro, A., Veiga, R., Velosa, A. (2014a). Mechanical and mineralogical properties of natural hydraulic lime-metakaolin mortars in different curing conditions. *Construction and Building Materials* 51. P. 287–294.

Выводы

На основании анализа представленных результатов можно сделать следующие выводы.

- ▷ Существует возможность создания растворных смесей с хорошим уровнем удобоукладываемости за счет введения различных фракций РК, полученных из отработанных покрышек; тем не менее при введении РК для обеспечения необходимой удобоукладываемости требуется более высокое соотношение вода/известь.
- ▷ Все растворы с РК имеют более низкие значения средней плотности по сравнению с эталонным раствором, что связано с более низкой плотностью РК относительно кварцевого песка и известкового камня.
- ▷ Введение РК приводит к значительному снижению механических показателей строительных растворов, в частности прочности при изгибе и сжатии, а также динамического модуля упругости; тем не менее прочность при сжатии раствора при введении 5% РК фракции Mixr превысило 1 МПа.
- ▷ Несмотря на снижение механических показателей раствора с РК и уменьшение динамического модуля упругости, увеличение соотношения прочности при изгибе к модулю динамической упругости свидетельствует об улучшении таких свойств, как деформативность и трещиностойкость большинства растворов с добавкой РК, особенно при 5% — ом содержании.
- ▷ Открытая пористость увеличивается до 2%. Эти данные подлежат дальнейшему изучению при анализе микроструктуры РК и растворов с РК.
- ▷ Растворы с добавкой смеси РК имеют более низкие коэффициенты капиллярного водопоглощения, чем эталонный раствор, в частности раствор с 5%-ом содержанием РК

8. CEN (1999), EN 1015–11. Methods of test for mortar for masonry. Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. Brussels.
9. CEN (1999), EN 1015–3. Methods of test for mortar for masonry. Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table). Brussels.
10. CEN (1998), EN 1015–6. Methods of test for mortar for masonry. Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar. Brussels.
11. CEN (1998), prEN 1015–8. Methods of test for mortar for masonry. Part 8: Determination of water retentivity of fresh mortar. Brussels.
12. CEN (2004), EN 14146. Natural stone test methods. Determination of dynamic elastic modulus of elasticity (by measuring the fundamental resonance frequency). Brussels.
13. CEN (2006), EN 1936. Natural stone test methods. Determination of real density and apparent density, and of total and open porosity. Brussels.
14. CEN (2009), EN 15801. Conservation of cultural property. Test methods. Determination of water absorption by capillarity. Brussels.
15. CEN (2002), EN 1015–18. Methods of test for mortar for masonry. Part 18: Determination of water-absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar. Brussels.
16. CEN (2013), EN 16322. Conservation of cultural heritage. Test methods. Determination of drying properties.
17. CEN (2003), EN 998–1. Specification for mortar for masonry. Part 1: Rendering and plastering mortar. Brussels.
18. CEN (2003), EN 998–2. Specification for mortar for masonry. Part 2: Masonry mortar. Brussels.

- характеризуется низкой скоростью капиллярного водопоглощения; объяснение этому факту также следует искать в исследовании микроструктуры строительного раствора с РК.
- ▷ Растворы с отдельными фракциями РК обладают весьма невысокими показателями скорости и общего капиллярного водопоглощения.
 - ▷ Все растворы с РК имеют более высокую первичную скорость высыхания, чем эталонный раствор, что должно привести к более быстрому испарению воды.
 - ▷ Теплопроводность и средняя плотность растворов снижаются по мере введения РК.

Полученные результаты показывают, что использование РК, поступающей с предприятий, специализирующихся на переработке отработанных покрышек, потенциально перспективно и может открыть возможности применения РК в качестве сырья при производстве строительных растворов. Максимальный эффект достигается при введении 5%-ом РК от массы песка. Дальнейшее исследование показателей растворов с РК ведется в направлении изучения микроструктуры растворов с РК и процессов деградации свойств вследствие химического выщелачивания. Окончательное определение показателей с учетом ранее полученных результатов позволит выявить возможности их применения, например, в качестве штукатурных смесей, в том числе в гипсовых, кладочных или напольных смесях. Составы будут оптимизированы с учетом области применения и требований стандартов (EN 998–1 и 2 [17, 18]).

Благодарность

Мы благодарим Витора Сильву за помощь в проведении серии экспериментов, компанию BANDAGUE за продукт в виде РК и компанию SECIL Argamassas за предоставление NHL 3.5. Результаты исследования впервые были представлены в 2015 г. на саммите Европейской ассоциации производителей строительных растворов.



www.facebook.com/alitinform

www.twitter.com/alitinform