

# 结构混凝土用建筑和拆除废物产生的再生骨料： 成分、性能和生产

若昂·布里托，豪尔赫·德·帕切科  
葡萄牙建筑工程系

**摘要：**本文关注建筑和拆除废物作为混凝土粗再生骨料的回收。粗再生骨料可用作天然骨料的部分或全部替代品，有助于循环经济，最大限度地减少垃圾填埋处理以及天然矿产资源的消耗。然而，建筑和拆除垃圾是一种质量不确定的异质材料，将这种垃圾加工成再生骨料需要确保再生骨料具有适合混凝土的性能。本文总结了与粗再生骨料相关的几个方面，具体涉及：(i) 建筑和拆除废物的典型组成；(ii) 不同类型的成分对再生骨料和再生骨料混凝土性能的影响；(iii) 混凝土中使用的再生骨料的要求；(iv) 再生骨料的生方法。有人认为，粗再生骨料是一种合适的建筑材料，具有足够的质量，即使在其生产中使用通用设备，并且建议将初步分离作为确保骨料质量的关键操作。

**关键词：**粗再生骨料；建筑和拆除垃圾；骨料生产；再生骨料混凝土；循环经济

## Recycled Aggregates Produced from Construction and Demolition Waste for Structural Concrete: Constituents, Properties and Production

João Brito and Jorge de Pacheco  
Department of Architectural Engineering, Portugal

**Abstract:** This paper concerns the recovery of construction and demolition waste as coarse recycled aggregates for concrete. Coarse recycled aggregates may be used as a partial or total replacement of natural aggregates, contributing to the circular economy and minimizing landfill disposals as well as the consumption of natural mineral resources. However, construction and demolition waste is a heterogeneous material with undefined quality and the processing of this waste into recycled aggregates needs to ensure that the recycled aggregates have suitable properties for concrete. This paper summarizes several aspects related to coarse recycled aggregates, specifically addressing: (i) the typical composition of construction and demolition waste; (ii) the influence of different types of constituents on the properties of recycled aggregates and recycled aggregate concrete; (iii) requirements for recycled aggregates to be used in concrete; and (iv) production methods of recycled aggregates. It is argued that coarse recycled aggregates are a suitable construction material with adequate quality, even when common equipment is used in their production and preliminary separation as a key operation for ensuring the quality of the aggregates is recommended.

**Keywords:** coarse recycled aggregates, construction and demolition waste, production of aggregates, recycled aggregate concrete, circular economy

### 引言：

立法正在推动混凝土行业朝着环保的方向发展，包括将建筑和拆除废物（CDW）作为二次原材料进行回收。在混凝土生产中用来自 CDW 的粗再生骨料（CRA）替代粗天然骨料（NA）就是这样一种情况，可以最大限

度地减少天然矿产资源的消耗，并提供一种将 CDW 作为原材料回收的方法。CDW 的回收是欧盟（EU）的一个紧迫问题，正在通过欧盟指令（例如欧盟指令 2008/98/EC 和 2018/851）和欧盟委员会的通信（例如关于建筑的部分）强制执行循环经济行动计划。此外，世界范围

内的研究表明,使用 CRA 可以生产具有合适性能的混凝土。然而,大多数地区的工业代理商并不轻易采用再生骨料混凝土,因为:

在特定情况下,NA 的成本可能低于 CRA;

客户、设计师和承包商仍然对 CRA 持怀疑态度,这种材料被视为不可靠。

在许多地区,由于缺乏市场,CDW 工厂无法生产适用于混凝土的 CRA。

由于这些障碍,混凝土行业对再生骨料(RA)的市场占有率非常有限。正如 UEPG(欧洲骨料协会)的 2019-2020 年度审查中所述,在 EU + EFTA(欧洲自由贸易协会)生产的所有骨料中,只有 10.6% 是 RA,其中大部分是 CRA。尽管与 2017-2018 年度审查的 6.1% 的数字相比有所增加,但事实是增加的潜力很大,因为观察到相关的国家与国家之间的差异:法国(27%)、英国(26%)、荷兰和马耳他(24%)和比利时(21%)使用的 RA 数量远高于平均水平。这表明执行/鼓励使用 RA 的政策可以显著增加市场吸收。此类措施预计将在未来发生,建筑代理和 CDW 工厂需要为此做好准备。

已经改变建筑业如何使用 RA 的措施的一个例子是欧盟指令 2018/851,该指令修订了欧盟指令 2008/98/EC。欧盟指令 2008/98/EC 规定了到 2020 年实现 70% 的非危险 CDW 再利用/回收的目标。然而,这一目标在欧盟的大部分国家都实现了,回填的贡献显著,这不仅构成了降级循环和是无意的,但实际上在某些条件下也可能被填埋。因此,欧盟指令 2018/851 将回填操作限制在必要的最低限度。为了了解这项措施的影响,在 2016 年,回填量占葡萄牙回收的 CDW 矿物部分的 50%。

这意味着需要除降级循环之外的 RA 用途。在混凝土中使用 CRA 是 CDW 回收的一种类型,将对循环经济做出有意义的贡献,因为混凝土由高达 80% 的体积骨料制成,是仅次于水的第二大使用材料。此外,在某些地区,NA 的使用变得越来越稀缺,因此需要替代的总量来源。

### 一、建筑和拆卸废物的产生

混凝土生产和建筑以及拆除废物的产生是二氧化碳不断排放到大气中的一些主要因素。本综述的主要目的是介绍世界各地建筑和拆除废物产生的现状,并随后对最近通过不同辅助材料改善再生骨料混凝土性能的研究进行批判性审查。对来自六大洲 40 个国家的信息进行了整理和批判性分析,重点关注当前的建筑和拆除废物产生以及相关政府机构采取的不同政策。简要讨论了每

个国家的未来目标和指标。截止 2012 年,全球 40 个国家的建筑和拆除垃圾总量每年超过 30 亿吨,而且这一趋势还在不断增加。包括印度和中国在内的发展中国家需要开发综合系统来监测和利用其巨大的 C&D 废物,并且需要政府层面的主动性来提高大众意识。通过建筑和拆除废物获得的再生骨料质量较差,一些研究人员建议使用不同的火山灰材料来增强其性能。此外,还建议使用 30% 至 50% 的再生骨料,以达到与添加胶凝材料的天然骨料混凝土相当的强度。

CDW 恢复的立法步骤是每年产生大量 CDW 的自然结果。根据欧盟统计局的数据,CDW 一直占欧盟产生的所有废物的 35% 以上,每年产生约 10 亿公吨,即人均 2.2 公吨。由于建筑、改造和拆除活动产生的 CDW 的性质,它们的组成是可变的。

按类型对 CDW 的表征非常重要,因为混凝土的 CRA 应主要由石头和混凝土废料组成,其次是陶瓷。CRA 的其他成分对混凝土性能有害影响,应避免使用。这些成分包括玻璃、塑料、金属、粘土、沥青材料和石膏基材料。这些类型的成分对混凝土有不同的意想不到的影响,例如凝结时间的变化、CRA 与水泥浆之间的弱结合、破坏性的化学反应以及混凝土的新鲜状态和硬化状态性能更差。

尽管大部分 CDW 由混凝土和陶瓷组成,但仍然存在大量其他材料。这意味着需要对非预期类型的废物进行初步分类和清除。此外,报告的 CDW 组成因国家而异。这是由于几个方面,例如一个地区的建筑传统、劳动力成本、设备、经济背景和废物管理立法,包括用于分类废物的标准。尽管如此,这些结果与澳大利亚和中华人民共和国等其他地区的报告结果一致。

CDW 被送到许可的 CDW 工厂,在那里按类型对废物进行分类。用于生产 RA 的部分随后经过一个加工阶段,其特点是去除有害物质、粉碎和尺寸分类,最终产生可用于不同类型应用的 RA,例如回填和道路建设(这些用途可见作为降级循环)和混凝土的 CRA,这是本文的主题。第 4 节讨论如何将 CDW 加工成适合混凝土生产的 CRA。

### 二、粗再生骨料

粗再生骨料的成分

CRA 由多种成分组成,这是 CDW 中存在的不同类型废物的自然结果。欧洲标准 EN 933-11 定义了 CRA 的以下成分:

-Ru——未结合的石头(实际上是天然骨料);

- Rc——混凝土和砂浆；
- Rb——粘土砌体、硅酸钙砌体、加气不浮混凝土；
- Ra——沥青材料；
- Rg——玻璃；
- X——其他材料（粘土、土壤、金属、非浮木、塑料、石膏基和橡胶）；
- FL——漂浮材料。

这些成分具有不同的特性，它们作为混凝土骨料的适用性也不相同。如发现的那样，吸水率越小，密度越大，CRA 对混凝土的适用性就越高。Ru（实际上是 NA）是最合适的成分，其次是 Rc 和 Rb。应谨慎看待所有其他成分，标准和规范会根据成分的含量限制 CRA 的加入。作为一般规则，CRA 应具有尽可能多的 Ru 和 Rc 类型的成分。

这也是首选使用 CRA 以损害精细再生骨料（FRA）的主要原因，因为 FRA 由非预期的成分组成，例如 X 型和分解砂浆（一种特定的劣质成分）存在于类型 Rc 和 Rb）。这意味着当将 CRA 与同一来源的 FRA 进行比较时，会发现显著差异，并且 CRA 是更好的汇总。因此，与使用 CRA 相比，与使用 FRA 相关的标准和建议更为严格。

为确保 CRA 具有足够的质量用于混凝土，生产过程包括初步分离，RA 可以由两种类型的 CDW 生产：

- 混合 CDW，通过去除大多数非预期材料（例如木材、大型塑料、土壤）来实现；
- 混凝土垃圾，因为这类垃圾质量好（主要是 Ru 和 Rc 类型的成分，由于初步分选不完善，污染物含量很少）。

根据他们的结果，作者认为，生产高质量的混凝土 CRA 要求木材、塑料、玻璃和沥青废料的含量尽可能低。这是通过在 CRA 生产过程中对有害材料进行初步分类和去除来实现的。混合 CDW 生产的 CRA 的典型成分如下：

- Rc 加 Ru 的含量约为 65% 至 85%；
- Rb 含量在 10% 到 35% 之间；
- Rg 和 Ra 的含量在 0% 和 2% 之间，但在特定情况下最高可达 10%；
- X 含量低于 2%。

当混凝土废料生产 CRA 时，Rc + Ru 的典型含量大于 90%，剩余的 CRA 主要由 Rb 组成。

某些类型的 CDW 的含量，即具有商业价值的那些（金属）和对混凝土性能损害最大的那些（例如，石膏

基）的含量大大降低。这是相关的，因为：

-混凝土的大多数性能都受到陶瓷的不利影响。陶瓷是多孔且脆弱的，它们的存在会降低 CRA 的骨料破碎值，并导致混凝土机械失效机制中出现大量的反骨料断裂。

-粘土有不同的不利影响。粘土的细颗粒可能会覆盖 CRA 的颗粒，从而削弱骨料与水泥浆体之间的结合。此外，由于这些颗粒比水泥小，它们也可能吸附在水泥颗粒上，从而损害水泥水合物的规则和均匀结晶。其他不利影响是由于它们的吸水量大，如果不加以考虑，可能会影响可加工性，以及对混凝土的凝固和硬化产生影响。粘土可能以较大尺寸的团块形式存在（包括在粗骨料尺寸范围内），尤其是在潮湿时。这些大的粘土颗粒在处理、运输和混合过程中往往会分解。

-石膏基材料（包括灰泥）可能会引发影响凝固的硫酸盐反应，最重要的是，这些材料会导致硬化混凝土的硫酸盐侵蚀，从而导致膨胀、开裂和剥落。

-玻璃和塑料与粘合剂的结合很差，金属成分容易腐蚀。这些类型的成分通常不适合混凝土（太片状和/或拉长）。

除了这些考虑之外，骨料应该是坚硬的、相对圆的、具有小孔隙率和相对坚固的。

的纳米压痕测试对于了解 CRA 特定成分的机械性能以及骨料和粘结剂浆料之间的相应界面过渡区（ITZ）特别有用：这些作者生产的混凝土采用来自混合 CDW 的 CRA 制成。玻璃成分的结果特别有趣：它们比所有其他成分都硬得多，但它们与粘合剂糊的结合力差会导致多孔和可变形的 ITZ。

#### 粗再生骨料的性质

CRA 成分的特殊性意味着，与 NA（原石）相比，CRA 更弱、更易变形、更多孔、更轻、吸水性更大。由于它们的成分，CRA 也比 NA 更粗糙。在几何形状方面，CRA 往往更脆，更细长，这主要是由于两个原因：

其部分成分的性质（例如，Rb 类型的成分，如瓷砖和砖），它们往往会破碎成细长的形状；

许多 CDW 工厂仅使用初级破碎，通常使用颚式破碎机。这也将导致更细长的颗粒。

当比较这些数据时，很明显，由混凝土废料生产的 CRA 是具有最佳混凝土性能（吸水率更小，密度更大）的 CRA。此外，FRA 的性能比 CRA 差。将 CRA 的吸水率与粗碎石灰石的吸水率（在 1.0% 至 2.5% 之间）进行比较，显然 CRA 的吸水率要大得多。

CRA 和 FRA 的大吸水率主要是由它们的孔隙率引起的, 这意味着在预拌厂的混凝土配料需要特别考虑。在实验室中, 生产速度允许正确测量 RA 的吸水率和含水量, 并在定义有效 w/c 比率时加以考虑。然而, 在工业规模上, 在不影响生产时间的情况下, 既不能测量工厂当前特定批次 RA 的吸水率, 也不能测量 RA 的含水量。此外, 发现在预拌植物中用于确定骨料含水量的快速实验方法不适用于 RA, 因为它们只能准确测量骨料表面的含水量。这可能对再生骨料混凝土混合物的有效含水量产生相关影响, 并可能导致机械性能的相关降低。由于这些考虑, 应优先选择在预饱和湿度条件下使用的 RA。

石灰石 NA 的饱和表干密度在 2600 kg/m<sup>3</sup> 和 2700 kg/m<sup>3</sup> 之间。在配合比设计中需要考虑 CRA 的较小密度, 因为如果仅根据重量直接用 CRA 代替 NA, 则骨料的体积会变大, 代价是粘合剂浆料的含量较少。

CRA 的一个具体问题是它们的可变性, 因为提供给混凝土生产商的不同批次的 CRA 取决于原始 CDW 废物的质量。即使 CRA 的成分是 Rc+Ru, 这种可变性也是相关的: 不同的混凝土(废料)组合物具有不同的配合比设计, 并且使用的混凝土(废料)组合物中的 NA 类型不一定相同。这是可以理解的, 其中发现从混凝土废物中产生的 CRA 的 24 小时吸水率(在 4.9% 和 11.9% 之间)存在很大的批次间差异。

由于 CRA 的典型生产工艺不如用于生产 NA 的优化(即在破碎和筛分方面), CRA 的级配可能不如 NA 适合混凝土, CRA 的空隙率趋于较大, 对混凝土的力学性能和耐久性能产生不利影响。

CRA 的化学污染通常不会被讨论, 但它是一个相关方面。CDW 从多个来源到达 CDW 工厂, 可能存在不同类型的污染物并损害混凝土的性能。已经提到了基于石膏和粘土的成分的影响。CRA 可能被多种来源的有机物和盐(氯化物、硫酸盐和其他)污染, 并且根据物质的不同, 有害影响包括混凝土凝固和硬化的变化、长期不利的化学反应(如硫酸盐侵蚀)、风化和钢筋腐蚀。CRA 硫酸盐的总含量可能很大, 因为它们是粘附砂浆的硫酸盐和混凝土废料的 NA 的总和。

#### 混凝土用粗再生骨料的要求

本节介绍了在遵循欧洲标准(EN)的地区在混凝土中使用 CRA 的要求。如前所述, 其他地方也使用类似的框架, 地区差异主要是由于以前使用 CRA 的经验。

CRA 的大多数要求与 NA 必须遵守的要求相同。其中大部分在 EN12620 中找到, 其中介绍了混凝土骨料

的特性、要求和分类, 在 EN206 的附录 E 中给出了对 EN12620 中提出的 CRA 的一些特性的建议。这两份文件还包括解决对 CRA 特征的具体疑问的条款。大多数标准包括 CRA 条款和再生骨料混凝土状态建议, 而不是强制执行严格的条件。这部分是由于 CRA 是一种可变材料。

本节提出的要求涉及钢筋混凝土, 因为这是迄今为止生产最多的结构混凝土类型。EN206 还允许有关在混凝土中使用 CRA 的特定国家文件, 例如葡萄牙规范 LNEC E471。

关于分级, 适用 EN12620 对 NA 的一般要求。然而, CRA 的罚款含量通常是有限的(例如, 在 LNEC E471 中, 根据 CRA 的成分, 罚款为 3% 或 4%, 而西班牙 EHE 08 的附件 15 将罚款限制为 1.5%)。由于粗糙、易碎和附着在 CRA 成分上的小颗粒, 这可能难以实现。

### 三、将 CDW 加工成再生骨料

CRA 的质量取决于用于生产它的设备和工艺。可以使用多种设备和工艺组合, 本节总结了工艺及其相关性。除了需要清除非预期废物外, CRA 的生产与 NA 的生产并无太大区别: 大块物料按尺寸进行运输、粉碎和筛选。此外, 生产必须确保 CRA 具有良好的质量并符合本文前面部分提出的要求。

CDW 通过卡车运送到有执照的 CDW 工厂, 并对负载进行初步检查和验收。该检查在接受负载之前检查 CDW 是否符合向 CDW 工厂申报的成分。交付的 CDW 的组成取决于在建筑/拆除现场为分离不同类型的废物而付出的努力。为了促进承包商的分离, 交付混合 CDW 的负载比交付分离类型的 CDW 成本更高。此外, 如中所述, 负载不符合 CDW 声明类型和/或法律要求的承包商可能会被禁止进入 CDW 工厂。

接受负载后, CDW 可以:

- 无论何时交付的 CDW 的非预期成分污染程度较低, 都会立即送至 RA 进行处理; 或者

- 只要包含大量此类废物, 就会对非预期成分进行初步去除和分类。在这个阶段, 不应包含在 RA 中的成分会被移除, 例如木材、石膏板、塑料、沥青。该操作通常使用挖掘机进行。

在任何一种情况下, 大型 CDW 块都用液压锤或液压夹具破碎, 以便有足够的尺寸和重量进行加工。

### 四、促进再生骨料市场吸收的讨论和策略

上一节介绍了用于将 CDW 处理为 RA 的常用技术和流程。存在更先进的技术, 但由于目前缺乏对高质量 CRA 的相关市场需求, 大多数地区并未使用该技术。预

计这种情况将会改变，因为社会担忧导致对混凝土 CRA 认证的需求将增加，这推动市场转向绿色标签产品，并导致立法措施促进工业代理的可持续选择。

在此背景下，选矿方法提高了 CRA 的质量并减轻了其异质性，并被提出作为 CRA 符合标准的解决方案。这些选矿方法包括：

-包裹方法，其中浆液用于覆盖 CRA 的颗粒。这种浆料可以用不同的材料（例如水泥、硅灰、粉煤灰）制成，并将填充 CRA 的孔隙，降低孔隙率和吸水率，并增加密度、刚度和强度。或者，CRA 的表面可以涂有防水剂。

-由于酸溶解（例如，使用盐酸、硫酸或乙酸）或通过加热，从 Rc 成分中去除大部分附着砂浆的热处理和酸处理会损坏 Rc 成分的附着砂浆的水合产物，导致其分解。

-通过磨损机械去除 CRA 中较弱/易碎的成分。该方法设想用于由混凝土废料（成分 Rc 和 Ru）生产的 CRA，并从 Rc 成分中去除附着的砂浆。当该方法用于含有大量较弱成分（例如 Rb）的 CRA 时，可能会产生大量细粉，并且随着再生细粉和 FRA 的过量产生，CRA 的总含量可能会急剧下降。

-强制碳化，通过二氧化碳与 Rc 成分的表面附着砂浆中存在的钙物质反应来改善 CRA 的性能。该反应产生碳酸钙并使 CRA 的孔隙微观结构致密化。

-超声波清洗，一种从 CRA 中去除松散细粒的方法，改善 CRA 和新的混凝土粘结剂糊剂之间的粘合。

这些处理主要针对减少附着砂浆的 Rc 成分的不利影响，并且它们的有益效果已通过实验证明。然而，成本、环境影响和工业实施困难是选矿方法升级的障碍。

事实上，由于 CRA 的部分合并率足以吸收每年产生的所有 CDW（在欧盟的情况下，20% 的合并率就足够了），未处理的 CRA 的部分合并作为总和与在更大的掺入率下使用选矿 CRA 相比，混凝土是一种更实用、更有效的方法来评估 CDW。

为了确保未经处理的 CRA 具有足够的质量，用于生产它们的 CDW 应主要由混凝土废料组成。这确保了成分 Rb 和 Ru 的高含量。CRA 的成分由 CDW 的初步分离和破碎后的 CRA 分选来控制。CDW 的初步分离是确保 CRA 具有足够成分的更可靠的方法，因为破碎后的分离效率不高。此外，初步分离允许立即将不同类型的废物（例如木材、玻璃和塑料）送到最合适的目的地，从而提高回收过程和废物回收的整体效率。

## 结论：

本文介绍了由建筑和拆迁废料生产的用于混凝土的粗再生骨料的特性、要求和生产。粗再生骨料是混凝土行业的可行材料。然而，它们与天然骨料不同，它们的特性和是否符合标准在很大程度上取决于承包商（分离建筑和拆除废物）和建筑和拆除废物厂的操作类型。

粗再生骨料的不同生产方法和内在的异质性意味着它们是一种可变材料，这导致混凝土行业有所保留。然而，立法有望改变目前的模式，粗再生骨料将成为混凝土行业的常见原材料。因此，建筑和拆除垃圾厂需要以一致的方式生产符合混凝土使用要求的粗回收骨料。这些要求旨在确保这些骨料具有足够好的质量用于混凝土中，因为由于它们的性质，它们比传统粉碎的天然骨料更差的材料，并且它们在混凝土中的使用引起了一些问题。标准和国家标准的要求通过以下方式解决了主要问题：

-粗再生骨料根据其成分进行分类，并定义预期成分的最低含量和非预期成分的最大含量，以便建筑和拆除工厂确保在生产过程中从再生骨料中去除非预期成分。

-由于化学污染和粘土对混凝土的有害影响，按成分分类尤为重要。清洗可以缓解这两个问题，但在建筑和拆除垃圾厂中并不常见。再生骨料与成分含量的合规性减轻了这两种影响，因为粘土含量减少了，石膏板和沥青等成分被尽可能地去除了，从而最大限度地减少了有害化学反应的可能性。

-直接定义对特定性能的最低要求，包括与机械性能（例如，洛杉矶磨损）和化学污染（例如，酸溶性硫酸盐的含量）相关的要求。

-由于吸水率和密度与骨料的整体质量以及再生骨料生产的工业挑战相关，因此一些法规选择定义吸水率的最大值和密度的最小值。

-此外，由于粗再生骨料特性的可变性，与 NA 相比，标准通常规定 RA 的测试频率更高。

本文针对这些问题，提出了粗再生骨料的常见生产方法，以及可以生产质量更好的粗再生骨料的选矿方法。然而，由于工业挑战以及与选矿相关的成本和环境影响增加，未选矿的粗回收骨料的部分掺入率被争论。

该论文还介绍了其他部分再生材料（细再生骨料、再生细料和再生水泥）使用的研究趋势。

由于再生骨料的处理方法存在非常相关的差异，建筑和拆除垃圾厂可能不知道确保再生骨料具有足够质量以符合一个地区使用的标准的最佳方法。明确定义建筑

和拆除工厂生产具有适合结构混凝土应用质量的再生骨料的最低最佳实践要求将是朝着这个方向迈出的非常重要的一步。

作为未来的研究，作者推荐以下主题：

-其他部分再生骨料的回收研究。精细再生骨料通常用于砂浆研究，但并未获得工业认可。此外，再生细粉也没有明确的目标，需要对再生水泥的使用，包括回收工艺进行研究。需要这些材料的替代用途。

-使用再生骨料的主要动机是可持续性；因此，使用再生骨料生产混凝土的总体环境影响应小于仅使用天然骨料制成的混凝土。情况并非总是如此，应开发用于加速估计两者的环境影响的方法以帮助决策。

-粗再生骨料的性能在一些现象中仍未完全了解，例如碱-二氧化硅反应和浸出。更好地了解粗回收骨料导致意外行为的条件将是帮助制定未来法规的重要一步。

#### 参考文献：

[1]EU DIRECTIVE-2008/98/EC of the European Parliament and the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives. Off. J. Eur. Union. 2008;34:99 - 126.

[2]EU DIRECTIVE-2018/851 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2008/98/EC on waste. Off. J. Eur. Union. 2018;150:109 - 140.

[3]COM/2020/98 Final . Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee

of Regions: A New Circular Economy Action Plan. For a Cleaner and More Competitive Europe. European Commission; Brussels, Belgium: 2020.

[4]UEPG . Annual Review 2019-2020. European Aggregates Association (UEPG); Brussels, Belgium: 2020.

[5]UEPG . Annual Review 2017-2018. European Aggregates Association (UEPG); Brussels, Belgium: 2018.

[6]Ioannidou D., Meylan G., Sonnemann G., Habert G. Is gravel becoming scarce? Evaluating the local criticality of construction aggregates. Resour. Conserv. Recycl. 2017;126:25 - 33. doi: 10.1016/j.resconrec.2017.07.016.

[7]Khoury E., Ambrós W., Cazacliu B., Sampaio C.H., Remond S. Heterogeneity of recycled concrete aggregates, an in-trinsic variability. Constr. Build. Mater. 2018;175:705 - 713. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.163.

[8]Múlia M., de Brito J., Pinheiro M.D., Bravo M. Construction and demolition waste indicators. Waste Manag. Res. 2013;31:241 - 255. doi: 10.1177/0734242X12471707.

[9]Xiao J., Ma Z., Ding T. Reclamation chain of waste concrete: A case study of Shanghai. Waste Manag. 2016;48:334 - 343. doi: 10.1016/j.wasman.2015.09.018.

[10]Silva R.V., De Brito J., Dhir R.K. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. Constr. Build. Mater. 2014;65:201 - 217. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117.