

混凝土浆水混合物循环利用的成本效益与应用

饶 明, 龚建文

贵州黔桂拓达商砼有限公司, 贵州 贵阳

收稿日期: 2026年8月3日; 录用日期: 2026年8月24日; 发布日期: 2026年9月7日

摘 要

目的: 针对预拌混凝土生产中车罐、搅拌机与回收系统清洗产生的浆水混合物, 构建兼顾资源替代、处置减量和工程质量的循环利用评价方法。方法: 基于现行预拌混凝土、再生细骨料和混凝土试验标准, 结合循环经济政策、公开水价与建材价格信息, 建立“源头分流-预处理-水固分离-质量控制-分级利用”的闭路流程, 并以年产30万 m^3 搅拌站为基准情景开展物料平衡、全寿命成本和敏感性分析。结果: 在浆水产生强度 $0.18 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 、回用水率80%、细料资源化率70%的条件下, 年可替代生产与清洗用水 4.32 万m^3 , 回收细料3024 t; 年度毛收益约59.8万元, 扣除22.0万元运行维护费用后的年度净现金流约37.8万元, 静态投资回收期约3.2年。结论: 浆水循环利用的经济性主要受浆水产生强度、处置运输综合费用和细料消纳路径影响; 通过分质收集、在线计量、试配验证与用途分级, 可在不降低结构混凝土质量控制要求的前提下实现资源、环境与经济协同收益。

关键词

混凝土浆水, 循环利用, 成本效益, 预拌混凝土, 绿色生产

Cost-Effectiveness and Applications of Concrete Slurry Recycling

Ming Rao, Jianwen Gong

Guizhou Qiangui Tuoda Commercial Concrete Co., Ltd., Guiyang Guizhou

Received: August 3, 2026; accepted: August 24, 2026; published: September 7, 2026

Abstract

Objective: To develop a circular utilization evaluation method for the slurry mixture generated during the cleaning of concrete mixing trucks, mixers, and recycling systems in ready-mix concrete production, which integrates resource substitution, disposal reduction, and engineering quality considerations. **Methods:** Based on current testing standards for ready-mix concrete, recycled fine

aggregates, and concrete, and by incorporating circular economy policies, publicly available water prices, and building material price information, this study establishes a closed-loop process consisting of “source diversion-pre-treatment-water-solid separation-quality control-graded utilization”; using a concrete batching plant with an annual output of 300,000 m³ as the baseline scenario, material balance, total life-cycle cost, and sensitivity analyses were conducted. Results: Under conditions where the slurry generation intensity is 0.18 m³/m³, the reclaimed water rate is 80%, and the fine aggregate resource recovery rate is 70%, the system can replace 43,200 m³ of production and cleaning water annually and recover 3024 t of fine aggregates; the annual gross revenue is approximately 598,000 RMB, the annual net cash flow after deducting operating and maintenance costs of 220,000 RMB is approximately 378,000 RMB, and the static payback period is approximately 3.2 years. Conclusion: The economic viability of slurry recycling is primarily influenced by the slurry generation intensity, the comprehensive disposal and transportation costs, and the utilization pathway for fine aggregates; through qualitative separation, online metering, trial mixing verification, and graded allocation of applications, synergistic benefits for resources, the environment, and the economy can be achieved without compromising the quality control requirements for structural concrete.

Keywords

Concrete Slurry, Recycling, Cost-Effectiveness, Ready-Mix Concrete, Green Production

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

预拌混凝土生产具有连续性强、设备清洗频繁和物料循环链条长等特点。搅拌机、运输车罐、砂石分离机及回收系统在冲洗过程中会形成含水泥颗粒、砂石细料、外加剂残留和碱性液相的浆水混合物。若采用“收集-沉淀外运”或直接排放的粗放处理方式,不仅增加水资源消耗、污水处理和固废处置压力,也会造成残余细料价值流失。预拌混凝土绿色生产技术规程要求生产废水、废浆收集处理和综合利用[1];预拌混凝土产品质量与生产管理要求见 GB/T 14902-2012 [2];再生细骨料利用可参考 GB/T 25176-2010 [3];混凝土性能检验按 GB/T 50081-2019 执行[4];国家循环经济政策强调建筑废弃物资源化利用[5]。地方公开水价文件可为工程经济核算提供基准[6],但不同地区供水和污水处理费存在差异[7]。因此,浆水资源化不应仅被视为环保附属环节,而应进入搅拌站的物料平衡和经营核算体系。

现有研究主要聚焦于浆水或回收水对新拌混凝土工作性、凝结时间和强度的影响。Chatveera 和 Lertwattananuruk 研究了预拌混凝土厂浆水在含外加剂混凝土中的应用[8];Ružinski 等讨论了预拌混凝土厂废水再利用的技术路径[9];Férriz-Papí 总结了超量新拌混凝土与洗涤水的回收方法[10];Vaičiukynienė 等进一步分析了洗车废水在水泥体系中的利用可能[11]。工程实践则更关注回收装置的可靠性和清洗效率。两类关注点之间仍存在一个关键缺口:技术可行性并不必然转化为投资可行性。对于企业决策而言,必须同时回答三个问题:一是浆水中水相和固相分别能替代什么资源;二是质量波动如何被控制并折算为可用产品;三是节水、避免处置、材料回收与运行维护之间能否形成正的现金流。

本文以公开标准、政策文件和价格信息为证据基础,避免将情景计算表述为现场实测结果。通过构建典型搅拌站的参数化模型,量化浆水循环利用的物料平衡、成本效益和敏感性,并给出可落地的质量控制与分级利用策略。研究目标是为项目立项、设备选型和示范工程评价提供可复算的工程经济框架。

2. 研究设计与数据来源

2.1. 系统边界与技术路线

本系统边界从生产线内的车罐冲洗水、搅拌机及场地冲洗水、砂石分离机回流水开始，到回用水池、脱水细料仓和终端利用环节结束；不将厂外生活污水纳入计算。为降低组成波动，车洗水、设备冲洗水和含余料高浓度浆水应分质收集。高浓度浆水经格栅筛分、沉砂、均质、旋流或压滤后形成相对稳定的水相与固相；水相优先用于设备清洗、场地冲洗和经试配验证后的生产用水，固相优先进入再生细料、非结构混凝土制品或其他经验证的消纳路径。技术路线如图 1 所示。

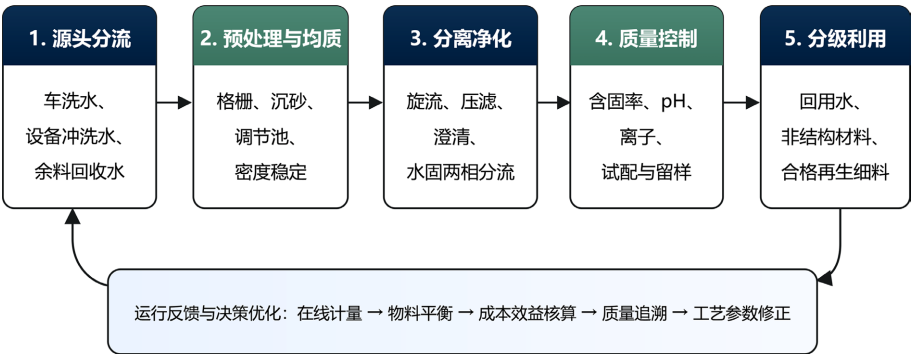


Figure 1. Framework for cost-benefit-oriented recycling of concrete slurry water
图 1. 面向成本效益的混凝土浆水混合物循环利用框架

2.2. 公开数据与基准情景

基准情景设定为年产 30 万 m³ 的预拌混凝土搅拌站。产能仅用于形成可比尺度，并不代表特定企业的实测产量。技术控制依据现行预拌混凝土绿色生产、预拌混凝土产品质量、再生细骨料和普通混凝土试验标准；细料利用路径参考再生细骨料的质量控制思路。水价采用公开城市工业用水和污水处理价格信息形成的保守合并值 3.30 元/m³；再生细料价值以公开工程询价中的低位可替代价值 65 元/t 计；浆渣处置运输综合费用按 60 元/t 计。后两项在不同地区差异较大，故作为可替换参数而非全国统一价格。标准试验系统结果数据见表 1。

Table 1. System resulting data of standard experiment
表 1. 标准试验系统结果数据

参数	基准取值	说明	主要依据
年混凝土产量	30 万 m ³ /a	典型中型搅拌站情景	情景设定
浆水产生强度	0.18 m ³ /m ³	低/高情景为 0.12/0.24	公开文献与工程参数区间
回用水率	80%	经沉降、分离和适配后回用	标准约束
干固体质量分数	8%	均质后按质量分数折算	情景设定
细料资源化率	70%	扣除无效泥渣与损耗	标准约束
水费与污水处理费	3.30 元/m ³	公开水价合并保守取值	公开水价
处置运输综合费用	60 元/t	含外运和末端处置的情景取值	公开收费信息与工程询价
回收细料价值	65 元/t	按低位可替代材料价值计	公开工程询价
初始投资	120 万元	分离、储存、输送、计量及安装	设备配置情景
年度运行维护费	22 万元/a	电耗、维护、药剂、检测和管理	情景核算

2.3. 成本效益计算模型

年浆水量、可回用水量 and 可回收细料量分别按式(1)~式(3)计算:

$$Q_s = V \cdot q_s \quad (1)$$

$$Q_w = Q_s \cdot \eta_w \quad (2)$$

$$M_r = Q_s \cdot \omega_s \cdot \eta_r \quad (3)$$

其中, V 为年混凝土产量, q_s 为单位产量浆水产生强度, η_w 为回用水率, ω_s 为干固体质量分数, η_r 为细料资源化率。

年度毛收益 B 由节水及污水处理费节约 B_w 、避免处置运输费用 B_d 和回收细料价值 B_r 构成, 即

$$B = B_w + B_d + B_r$$

年度净现金流 $NCF = B - C_o$; 静态投资回收期 $P = I_0 / NCF$, 其中 C_o 为年度运行维护费, I_0 为初始投资。

碳减排等环境收益单独报告, 不计入现金流, 避免将非确定性政策收益高估为企业可得收入。

2.4. 数据质量与不确定性处理

成本效益模型的可靠性取决于输入数据是否具备可追溯性。建议将数据分为三层: 第一层是由生产计量系统直接取得的硬数据, 包括混凝土产量、冲洗次数、补水量、沉渣外运量和设备运行时间; 第二层是通过检测或抽样得到的质量数据, 包括浆水密度、含固率、含水率、粒径分布、氯离子和硫酸盐含量; 第三层是需要本地化核实的价格与管理参数, 包括工业用水和污水处理费、外运处置费、再生细料替代价格、药剂单价以及人工维护成本。三层数据应分别保存原始记录、计算表和审批版本, 避免只保留经四舍五入后的结果。

对于浆水产生强度和干固体质量分数等波动较大的参数, 单点估计容易掩盖季节性、产品类型和清洗制度带来的影响。本文以 $0.12 \sim 0.24 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 的浆水产生强度构建低位、基准和高位情景, 并保持其他参数不变, 以识别规模效应的方向。工程项目可进一步采用月度实测分布、蒙特卡洛模拟或最小最大区间分析, 将设备故障、雨季稀释、异常退料和处置渠道中断等因素纳入现金流风险。若项目在低位情景下仍能保持正的年度净现金流, 则投资结论具有更强的稳健性; 若仅在高位情景成立, 则应优先采用共享设备或分期投资。

质量数据还应与经济数据同步关联。例如, 某批浆水因含固率过高而被降级为清洗用水, 虽然降低了回用水率, 却可能避免设备堵塞、管路清洗和混凝土质量异常造成的更大损失。将这些“避免风险成本”纳入管理台账, 可以防止企业为了追求表面回用率而牺牲系统稳定性。

3. 结果

3.1. 基准情景物料平衡

在基准情景下, 年浆水量为 5.40 万 m^3 。按 80% 的回用水率计算, 可形成 4.32 万 m^3 的可回用水; 其余部分作为浓缩液、沉渣夹带水和系统损耗处理。浆水干固体质量为 4320 t , 按 70% 的资源化率可得到 3024 t 可利用细料。该结果说明, 浆水循环利用的收益结构并非单一节水收益: 水相带来的现金节约约 14.26 万元 , 而避免处置运输费用与细料替代价值合计约 45.58 万元 , 占年度毛收益的 76.2%。因此, 若企业仅将系统定位为“节水装置”, 往往会低估其对处置成本和材料损失的削减作用。

需要强调的是, 3024 t 可利用细料并不等同于可无条件用于结构混凝土的材料。其实际消纳量取决

于颗粒级配、含泥量、残余水泥浆活性、氯离子与硫酸盐指标，以及与目标配合比的相容性。对于质量波动较大的细料，应优先进入非结构制品、垫层、路缘石或其他经项目验证的路径；只有完成试配并满足相应标准、设计和项目要求时，才可考虑在结构混凝土中使用。

3.2. 年度经济性与回收期

基准情景下，节水及污水处理费节约为 14.26 万元/a，避免处置运输费用为 25.92 万元/a，回收细料价值为 19.66 万元/a，年度毛收益合计 59.83 万元/a。扣除电耗、维护、药剂、检测和管理等运行维护费用 22.00 万元/a 后，年度净现金流为 37.83 万元/a。若初始投资按 120 万元计，静态投资回收期为 3.17 年；按 8 年折旧期年化初始投资 15 万元后，年度净收益为 22.83 万元。与一次性外运处置相比，该结果表明在连续生产、浆水量较稳定且细料具备明确消纳路径的条件下，系统具有可接受的财务回报。

3.3. 敏感性与盈亏边界

图 2 和表 2 表明，浆水产生强度是最敏感的单一变量。在低位情景(0.12 m³/m³)下，年度净现金流仅 17.89 万元，回收期延长至 6.71 年，说明生产规模小、清洗频率低或回收系统闲置率高的站点不宜直接套用基准方案。反之，在高位情景(0.24 m³/m³)下，系统通过更高的水替代量、处置避免量和细料回收量形成规模效应，回收期缩短至 2.08 年。

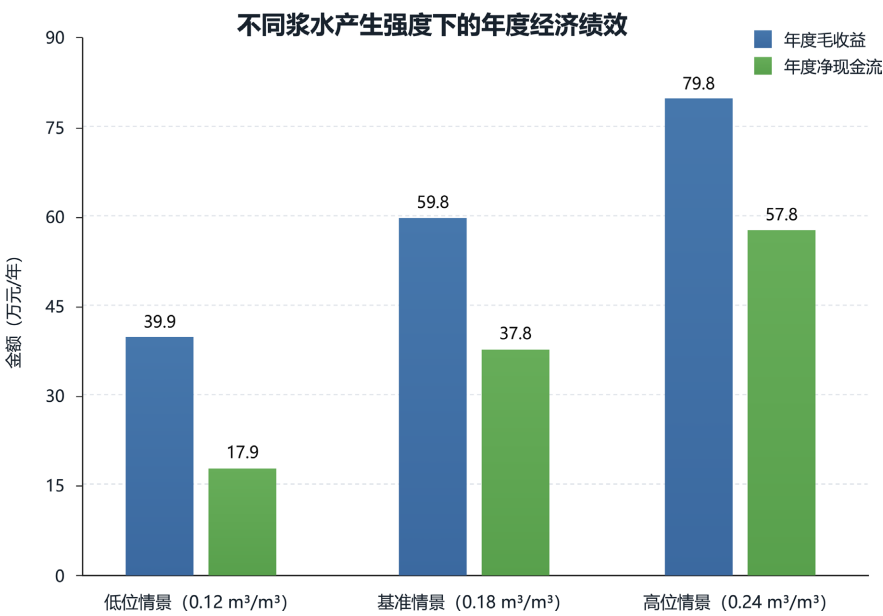


Figure 2. Annual economic performance under three slurry-generation scenarios
图 2. 三种浆水产生情景下的年度经济绩效

Table 2. Results of scenario-based economic evaluation
表 2. 情景化经济性评价结果

指标	低位情景	基准情景	高位情景
浆水产生强度(m³/m³)	0.12	0.18	0.24
年浆水量(万 m³)	3.60	5.40	7.20
可回用水量(万 m³)	2.88	4.32	5.76
可回收细料量(t)	2016	3024	4032

续表

年度毛收益(万元)	39.89	59.83	79.78
年度运行维护费(万元)	22.00	22.00	22.00
年度净现金流(万元)	17.89	37.83	57.78
静态投资回收期(a)	6.71	3.17	2.08
年化净收益* (万元)	2.89	22.83	42.78

注：*年化净收益 = 年度净现金流 - 初始投资/8；表中金额均为不含税情景计算值，四舍五入可能导致尾数差异。

除浆水量外，处置运输综合费用与细料消纳价格构成第二层敏感因素。若当地具备低价或免费填埋渠道，避免处置费用会下降，系统收益将更多依赖细料产品化；若外运距离长、处置费高，闭路利用的收益会显著提高。因而，投资前应至少开展三项本地化核查：近 12 个月的实际清洗水量与沉渣量、合规处置的完整运输和处置单价、可稳定消纳细料的内部或外部产品路径。

3.4. 质量控制与应用分级

浆水循环利用的关键不在于单纯提高回用比例，而在于建立与用途相匹配的质量门槛。建议将回用路径分为三级：一级为设备清洗、场地冲洗等非拌合用途，重点控制沉积、堵塞和外排风险；二级为经均质、检测和试配验证后的生产辅助用水或非结构制品用水；三级为进入结构混凝土的水相或细料，必须在配合比设计、性能检验和项目技术条件中得到明确许可。对每一批回用水至少记录来源、密度或含固率、pH、氯离子、硫酸盐、储存时间和适配试验结果；对细料应记录粒径分布、含泥量、含水率与最终去向。

3.5. 资源与环境协同效益

除直接现金收益外，基准情景每年替代 4.32 万 m³ 新鲜生产与清洗用水，减少 4320 t 含固浆渣进入外运处置环节，并以 3024 t 再生细料替代部分天然细集料。若按项目实际能源、运输距离和材料来源测算，还可进一步核算取水、污水处理、运输和天然骨料开采环节的间接排放。本文不把该部分折算为企业收入，是因为不同地区的电力排放因子、运输方式、处置路径和碳价格差异较大；但从环境绩效角度看，水资源替代、固废减量和天然材料开采减量具有方向一致的协同作用。

在环境风险控制方面，闭路系统能够减少高碱性浆水无组织外排、雨污混流和沉渣长期堆存的可能性，但前提是厂区必须设置防渗、分区收集、溢流报警和应急旁路。若储存池容积不足或极端降雨下发生溢流，环境风险可能由“常态小排放”转化为“短时集中排放”。因此，环境绩效评价应同时记录正常运行量、异常排放量和应急处置记录，不能只报告回用率这一单一指标。

3.6. 工程实施的阶段化路径

工程实施宜采用“基线调查小试验证连续示范规模化复制”四个阶段。基线调查阶段连续记录至少一个生产周期的冲洗水量、浆渣量和外运费用；小试验证阶段对水相和固相分别进行沉降、压滤、储存和配合比适配试验；连续示范阶段重点观察 3~6 个月内的回用率、质量波动、设备故障和实际现金流；规模化复制阶段再将成熟参数固化为企业标准作业程序和采购技术条件。每个阶段都应设置“继续、降级或暂停”判据，特别是结构混凝土回用途径，必须以试验结果和项目技术负责人签字为前置条件。

4. 讨论

4.1. 技术适用边界

本研究模型适用于具有相对稳定生产节奏、已配置或拟配置砂石分离与废水收集条件的预拌混凝土

站。对于间歇生产、小批量供应或场地受限的站点, 固定投资和人员维护可能难以被浆水量摊薄; 此时可考虑区域集中处理、设备租赁或与周边构件厂协同消纳等模式。对于含有特殊外加剂、海工环境材料或高耐久性结构混凝土的生产线, 应将浆水与普通生产线分开管理, 以降低氯离子、硫酸盐及外加剂残留对性能的潜在影响。

4.2. 经济核算边界

本文将节水、避免处置和细料替代计入现金收益, 而将碳减排、环境风险降低和绿色评价加分列为非货币化协同效益。这样的处理较为保守: 一方面, 碳价格、补贴和绿色金融激励具有地区和时期差异, 不能视为确定收入; 另一方面, 合规处置、雨污分流和现场文明生产本身会降低环境处罚与投诉风险, 但其避免损失难以稳健量化。实际项目可在本文基础上增加碳核算、土地占用、设备残值、税费、融资成本和不确定性分析, 形成更完整的全寿命周期评价。

4.3. 管理机制与示范路径

建议将浆水回收系统纳入搅拌站生产管理的日常 KPI, 而非作为环保部门的孤立设备。可设置单位混凝土浆水产生强度、回用水率、细料资源化率、非合格浆体比例、单位产品处置费用和质量异常次数等指标, 并按日采集、按月复盘。示范项目宜先选择产量稳定、外运处置成本较高且具备非结构制品或内部消纳场景的站点; 在连续运行 3~6 个月后, 依据计量数据校正本地参数, 再决定是否扩大到结构混凝土回用路径。

4.4. 研究局限与后续工作

本文采用公开资料和参数化情景, 未对某一具体搅拌站进行连续现场采样, 因此结果的作用是提供可复算的决策基线, 而不是替代项目验收数据。后续研究可从三个方向深化: 其一, 建立不同强度等级、不同外加剂体系和不同季节条件下的浆水组成数据库; 其二, 开展回用水和回收细料对工作性、凝结、收缩、耐久性及长期强度的连续试验; 其三, 将设备寿命、融资成本、税费、残值、碳核算和区域协同运输纳入全寿命周期模型。通过“现场计量实验验证经济回算”的闭环, 可将本文的筛选模型升级为企业级数字化管理工具。

5. 结论

(1) 基于“源头分流预处理分离净化质量控制分级利用”的闭路框架, 可将混凝土浆水混合物由末端处置对象转化为可计量的水相与固相资源, 并将技术控制与经营核算连接起来。

(2) 以年产 30 万 m^3 搅拌站为基准情景, 浆水产生强度为 $0.18 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 、回用水率 80%、细料资源化率 70% 时, 年可回用水 4.32 万 m^3 、可回收细料 3024 t; 年度毛收益约 59.8 万元, 年度净现金流约 37.8 万元, 静态投资回收期约 3.2 年。

(3) 浆水产生强度、处置运输综合费用和细料消纳路径决定经济可行性。低浆水量站点应重点评估设备共享、集中处理或租赁模式; 中大型站点则应优先解决稳定回收与材料消纳问题。

(4) 工程应用必须坚持用途分级和性能验证。未经均质、检测与试配确认的浆水和细料不得直接用于结构混凝土; 最终利用方案应满足现行标准、项目技术条件及地方环保管理要求。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ/T 328-2014 预拌混凝土绿色生产及管理技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.

-
- [2] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 14902-2012 预拌混凝土[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
 - [3] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 25176-2010 混凝土和砂浆用再生细骨料[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
 - [4] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 50081-2019 普通混凝土力学性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
 - [5] 国家发展改革委关于印发“十四五”循环经济发展规划的通知[EB/OL].
https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202107/t20210707_1285527.html?code=&, 2021-07-07.
 - [6] 关于进一步完善我市自来水价格形成机制的通知: 东发改规(2025)1号[EB/OL].
https://dgdg.dg.gov.cn/xwzx/tzgg/content/post_4401459.html, 2025-07-01.
 - [7] 关于调整阿图什市城市供水和污水处理费价格的通知: 阿政规(2025)1号[EB/OL].
<https://www.xjats.gov.cn/xjats/c103905/202504/fcc2098def1147ce9f90a3412086baf2.shtml>, 2025-04-01.
 - [8] Chatveera, B. and Lertwattanaruk, P. (2009) Use of Ready-Mixed Concrete Plant Sludge Water in Concrete Containing an Additive or Admixture. *Journal of Environmental Management*, **90**, 1901-1908.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.01.008>
 - [9] Tsimas, S. and Zervaki, M. (2011) Reuse of Waste Water from Ready-Mixed Concrete Plants. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, **22**, 7-17. <https://doi.org/10.1108/14777831111098444>
 - [10] Ferriz Papí, J.A. (2014) Recycling of Fresh Concrete Exceeding and Wash Water in Concrete Mixing Plants. *Materiales de Construcción*, **64**, e004. <https://doi.org/10.3989/mc.2013.00113>
 - [11] Vaičiukynienė, D., Kantautas, A., Tučkutė, S., Manhanga, F., Janavičius, E., Ivanauskas, E., et al. (2021) The Using of Concrete Wash Water from Ready Mixed Concrete Plants in Cement Systems. *Materials*, **14**, Article 2483.
<https://doi.org/10.3390/ma14102483>