

# 对石灰石煅烧粘土水泥 (LC<sup>3</sup>) 浆料的新看法

吉尔伯托·达尔科尼, 毛里齐奥·阿蒂奥利, 卢卡·贝洛托

所属单位: 意大利地球科学部

**摘要:** 在这项工作中, 作者对控制石灰石煅烧粘土水泥 (LC<sup>3</sup>) 新状态性能的因素进行了评估, 并与波特兰水泥和二元水泥进行了比较, 通过将流变学测量与凝结时间测定相结合, 以及用一种新方法评估塑性收缩, 扩大了以前的研究范围。屈服应力和弹性模量被认为是当应力作用于系统时结构建立/分解过程的指标。另一方面, 塑性收缩发生在新鲜浆料的混合到凝固的过程中, 并在管理由于沉降和蒸发引起的微观结构变化中发挥着重要作用。对流变性能随时间的变化进行评估是适当的, 以便对不同添加材料的影响和行为有一个概览。所有粘合剂 (熟料、LC<sup>3</sup>、熟料-石灰石和熟料-煅烧粘土) 的弹性模量从混合到固化的60分钟都有如下增加。5.27 × 10<sup>3</sup> 至 9.50 × 10<sup>5</sup> 帕, 5.94 × 10<sup>3</sup> 至 9.87 × 10<sup>5</sup> 帕, 6.89 × 10<sup>3</sup> 至 5.62 × 10<sup>5</sup> 帕, 7.85 × 10<sup>3</sup> 至 1.27 × 10<sup>6</sup> 帕。此外, 在固化的前三个小时, LC<sup>3</sup> 表现出比熟料水泥减少2倍以上的塑性收缩。由于絮凝效应和吸水率的增加, 煅烧粘土与熟料的使用增加了体系的弹性模量, 而当二元水泥中存在高比例的石灰石时, 由于体系中的解絮凝和自由水的增加而产生了稀释效应。石灰石和煅烧粘土与熟料的结合可以引起额外的化学反应, 从而控制早期的性能, 如塑性收缩。所得结果有助于通过基于知识的方法优化 OPC、煅烧粘土和石灰石的三元混合物的新态性能。

**关键词:** 石灰石煅烧粘土水泥; LC<sup>3</sup>; 屈服应力; 塑性粘度; 流变学; 塑性收缩率

## A Fresh View on Limestone Calcined Clay Cement (LC<sup>3</sup>) Pastes

Gilberto Dalconi, Maurizio Artioli, Luca Bellotto

Affiliation: Department of Geosciences, Italy

**Abstract:** In this work, the factors controlling the fresh state properties of limestone calcined clay cement (LC<sup>3</sup>) are assessed and compared to Portland and binary cements, extending the scope of previous research by combining rheological measurements with setting time determination and the evaluation of plastic shrinkage by a novel method. Yield stress and elastic modulus are considered indicators for the structural build-up/breakdown process when stress is applied to the system. On the other hand, plastic shrinkage occurs from the mixing to the setting of fresh paste and plays an important role in governing microstructural changes due to settlement and evaporation. Evaluation of the rheological properties with time was appropriate to give an overview of the influence and behavior of different added materials. The elastic modulus of all binders (clinker, LC<sup>3</sup>, clinker-limestone, and clinker-calcined clay) was increased from mixing to 60 min of curing as follows: 5.27 × 10<sup>3</sup> to 9.50 × 10<sup>5</sup> Pa, 5.94 × 10<sup>3</sup> to 9.87 × 10<sup>5</sup> Pa, 6.89 × 10<sup>3</sup> to 5.62 × 10<sup>5</sup> Pa and 7.85 × 10<sup>3</sup> to 1.27 × 10<sup>6</sup> Pa, respectively. Moreover, during the first three hours of curing, LC<sup>3</sup> exhibited a reduction of plastic shrinkage by more than a factor of 2 compared to clinker cement. The use of calcined clay with clinker increases the elastic modulus of the system due to the flocculation effect and increased water absorption, while a dilution effect is contributed due to deflocculation and a free-water increase in the system when a high fraction of limestone is present in the binary cement. The combination of limestone and calcined clay with clinker can induce additional chemical reactions, which control the early age properties, such as plastic shrinkage. The obtained results can contribute to optimizing the fresh state properties of ternary blends of OPC, calcined clay, and limestone through a knowledge-based approach.

**Keywords:** limestone calcined clay cement; LC<sup>3</sup>; yield stress; plastic viscosity; rheology; plastic shrinkage

## 引言:

波特兰水泥 (PC) 被认为是优秀的建筑材料。这是由于它的高性能、良好的机械特性和良好的质量/价格比, 因为几乎可以在世界各地找到原材料。PC 主要由熟料矿物组成, C3S、C2S、C3A 和 C4AF 以及一小部分石膏。明矾石 (C3S) 相的形成需要高能量的燃烧, 这就是为什么水泥厂被认为是总体上向环境释放较多二氧化碳的行业之一的原因; 每生产一吨水泥, 制造过程就会释放约 900 公斤的二氧化碳。能源成本的增加和原材料的必要性加强了对开发替代类型的环保水泥的要求。最近, 硅酸二钙水泥的生产得到了广泛的考虑, 因为它的碳酸盐含量较低, 并且由于燃烧温度低而消耗能源, 从而减少了二氧化碳的排放。硅酸二钙是主要的相之一, 约占 PC 重量的 15–30%。该相可以通过在 800–1100 °C 下加热原材料来制备, 这比白矾土需要更少的能量。实际上, 利用更友好的原料在低温下制备硅酸二钙已经引起了多种研究的高度兴趣。

减少建筑业的碳足迹和内在能源的需要敦促了可持续水泥的发展。从材料组成的角度来看, 使用补充胶凝材料 (SCM), 如粉煤灰、硅灰、磨细的高炉矿渣和低等级粘土, 已显示出减少碳排放的适当方式。然而, 符合国际标准 (如 EN 197-1) 的 SCM 供应有限, 使得这一战略难以广泛维持。另一方面, 发展中国家面临着共同的挑战, 要面对经济增长所需的高水泥需求, 而 OPC 的高成本和其他国家富含粘土矿物的土壤的世界性供应使得新一代的水泥必须作为一个可行的替代品来处理所有这些挑战。因此, 最近, 由于石灰石煅烧粘土水泥 (LC3) 中熟料含量的减少, 研究人员和决策者对这种水泥的引进产生了极大的兴趣。

LC3 是一种新型的低碳水泥, 可以用大量低成本的 SCM 制成, 与普通波特兰水泥相比, 它可以减少 40% 的二氧化碳排放量。在这种情况下, 粘土和石灰石的大量供应有利于这一战略。LC3 的关键配方包括质量比为 2:1 的煅烧粘土和石灰石的组合, 并以高达 50 wt % 的比例替代大量的熟料。LC3 显示出与 OPC 相当的机械性能, 并在一些耐久性方面得到了改善。这类水泥不仅显示了煅烧粘土和石灰石的协同作用, 从而减少了大量的熟料消耗, 而且还降低了能源需求, 因为粘土的煅烧发生在 700 至 850 °C 之间。可以使用高岭土含量高达 40% 的低等级粘土, 在水化过程中会产生碳铝酸盐水合物, 可以改善混凝土的微观结构、机械性能和耐久性。然而, 由于高岭土的片状结构导致颗粒的细度和大的比表面, 煅烧

粘土可能会增加水的需求, 可能会导致新鲜胶凝材料的可操作性损失。工程和科学界一直致力于改善粘土基水泥的流动性, 以满足混凝土所需的可泵性, 但定义粘土流变行为的机制仍然没有得到很好的理解。

粘土 (即偏高岭土) 融入水泥基材料的主要困难是对水的需求, 这是由其不规则的形态结构造成的。实验分析, 如 FTIR、DTG 和 H<sub>2</sub>O 质量曲线被用来描述和研究粘土矿物的结构特征。结果表明, 粘土对水有明显的吸收作用。为了改善材料的可操作性, 进行了一些研究, 在粘土基材料中使用粘性调节剂来重新控制新鲜泥浆的屈服应力。Nair 等人指出, LC3 中的煅烧粘土增加了对超塑化剂的需求, 并且在长时间内保持流动性方面表现出一些困难。基本上, 新鲜的胶凝材料表现出屈服应力, 在这种情况下, 只有当施加的应力足够大时, 悬浮液才能流动, 随后, 当应力消除时, 微观结构逐渐恢复, 具有随时间变化的再覆盖性 (触变性)。以前的研究已经实施了特定的实验方法来确定重要的流变学参数, 如静态屈服应力、弹性模量和塑性粘度随静止时间的变化, 目的是为了了解不同悬浮液的时间依赖性结构恢复。Mahaut 等人测量了水泥浆的屈服应力随时间的演变, 以预测结构化率, 他们发现静止时结构化的演变与絮凝形成的固体结构的渐进性和可逆性有关。在粘土-水系统中, 研究表明, 粘度主要取决于所施加的剪切力和颗粒相互作用导致材料内部结构。此外, 在静止的重组过程中, 颗粒的重新排列导致了更强的相互作用网络的形成, 随着老化时间的增加。Pignon 等人已经证明了临界剪切的存在, 超过这个临界剪切, 粘土结构就会被分解成更小的絮状物, 而当系统被静止时, 就会出现结构的建立。此外, 堆积的特征时间比破坏的特征时间小 3 个数量级。另一方面, 了解新鲜浆料的收缩机制是预测铸造后变形的基础。据悉, 粘土与水混合时更容易发生收缩。Hu 等人提出的一个模型表明, 干燥收缩应变和收缩极限取决于粘土颗粒的可压缩性和流体部分的表面张力。

除了技术特性外, 由于较低的运行成本和 WACC (加权平均成本), LC3 的经济优势与 OPC 相比是相关的。随着过去十年对 LC3 的技术和环境效益的认可, 对其新鲜状态特性的认识水平和对各成分之间相互作用的理解也需要改进。本文专门对石灰石煅烧粘土水泥 (LC3) 的新鲜状态进行了实验研究。为了比较各成分对新状态行为的影响, 通过一系列的实验程序, 如在不同静止时间的旋转和振荡流变学测量, 对二元体系与 LC3 进行了平行表征。以前的两项研究中也实施了类似的方法。与

这些研究不同的是,我们将流变学测量的结果与二元和三元混合物的早期老化行为的额外测试进行比较,方法是通过维卡针测量凝固时间和最近开发的评估塑性收缩的方法。这些综合测量提供了LC3浆料的早期反应性和新鲜状态特性的总体看法,以及煅烧粘土和石灰石添加物在决定观察到的行为中的作用。

### 材料

本研究使用的起始材料是波特兰水泥,石灰石以废浆的形式从位于托斯卡纳的阿普安阿尔卑斯山的大理石采石场提供(卡拉拉,意大利)( $44^{\circ} 03' 08''$  N,  $10^{\circ} 14' 04''$  E),以及从Mûkûrwe'inî-(Ny-eri, 肯尼亚)获得的粘土( $0.5609^{\circ}$  南,  $37.0488^{\circ}$  东)。

粘土的矿物学成分是通过X射线衍射(XRD)测定的,使用Panalytical X'Pert Pro衍射仪(Malvern, UK),配备有X'Celerator探测器,操作范围为 $2\theta$   $5-85^{\circ}$ ,步长为 $0.017^{\circ}$ ,每步时间为100s。粘土在实验室烘箱中以 $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的加热速度在 $850^{\circ}\text{C}$ 下煅烧3小时。根据粘土和石灰石的XRD图案,高岭土表现出 $7.146\text{ \AA}$ 的基底距离( $d_{001}$ ),对应于 $14.413$ 的衍射峰。在煅烧后的粘土中,无定形部分,即偏高岭土,约为40%,而石英则高达55%。

在本研究中使用了四种粘合剂,其中石膏保持在5wt%不变,而熟料的数量则根据附加胶凝材料的存在与否而变化。熟料的总替代量保持在45wt%:煅烧粘土与石灰石之比为2:1的三元混合物(LC3)和仅含45wt%石灰石(KL)或煅烧粘土(KC)的二元混合物。

### 结果和讨论

#### 凝结时间

ESA 148-3:2000标准规定,OPC的凝结时间应在 $100 \pm 10$ 分钟和 $170 \pm 10$ 分钟之间,而对于混合水泥,其初凝和终凝时间应分别在 $180 \pm 10$ 分钟和 $2403 \pm 10$ 分钟之间。在本研究中,LC和KL粘结剂的初凝时间大致相似。另一方面,K和KC的数值不同(分别为90和130分钟)。参考粘结剂K具有较早的凝结时间,这是由于较快的C-S-H成核,导致水泥颗粒之间建立起桥梁的结果。用煅烧过的粘土或石灰石代替等量的熟料成分,会延迟初始和最终凝结。然而,两者的凝结修改是不同的。就大多数高岭土材料而言,它们在早期具有吸水能力和较差的沸石反应性,使用煅烧过的粘土可以改变化学平衡,由于水化熟料的比例较低而延迟水化速度,从而延迟了硅酸盐的析出和随后的凝结。在KL的情况下,与煅烧粘土(KCs)相比,添加石灰石可使初始凝结时间减少

20分钟。石灰石粉可以通过为硅酸钙水合物的沉淀提供成核点来加速熟料的水化,特别是C3S。另一方面,熟料(C3A)和石灰石(CO<sub>2</sub>)的高亲和力和力可以改变水化过程,形成碳铝酸盐相而不是硫铝酸盐。由于更多的石膏(SO<sub>3</sub>)由于形成碳铝酸盐而不是埃特灵石而留在溶液中,C3A的溶解速度下降,实现了水化反应和凝结的延缓。在以前的研究中,有报告称,石灰石和元高岭土(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.SiO<sub>2</sub>)部分替代OPC,存在于煅烧粘土中,可能诱发进一步的水化反应。石灰石在粘结剂中的存在会与存在于煅烧粘土和熟料中的铝酸钙以及波特兰石发生显著的反应,在早期阶段形成铝酸盐水合物相。混合成分的协同作用似乎对LC3的新鲜状态行为有重大影响。然而,其他方面,如替代部分、填料效应和偏高岭土与portlandite的比例也同样有贡献。

维卡试验不能准确地表明流变特性,如屈服应力和粘度及其随时间的变化,但它可以帮助更好地了解样品内颗粒相互作用的机制。一些作者指出,初凝时间与材料的弹性模量( $G'$ )相关。最近的研究表明,由于C-S-H和portlandite成核, $G'$ 随着凝结的开始而显著增加。然而,这种机制不一定与凝结前屈服应力的增加相吻合。这些发现表明了影响体系流变特性的不同机制:(i)新水泥的结构可以主要由C-S-H的成核和生长来控制,(ii)粘土絮凝形成的颗粒团聚体(絮凝体)中的吸附和夹带的水导致屈服应力和弹性模量增加,以及(iii)由于稀释效应,使用石灰石可以降低屈服应力和弹性模量。尽管如此,由于在整个测量过程中施加在材料上的力的不同,由维卡试验确定的流变特性并不足以描述新鲜泥浆的流变行为。流变仪能够检测到维卡针所不能接触到的结构组织的变化。

#### 流变学特性:屈服应力

根据熟料被石灰石和煅烧粘土取代对屈服应力随时间变化的影响,在早期(0分钟), $\tau_s$ 对于包括煅烧粘土、LC3和KC在内的粘合剂来说是比较高的,显示出比K的值大三到四倍。在静止期间,不同的粘结剂的 $\tau_s$ 以不同的速度增加。在静止30分钟后,粘结剂K的 $\tau_s$ 达到55.1Pa的值(比0分钟时高2倍),在静止60分钟后,在一个稳定的数值范围内略微下降。 $\tau_s$ 的这种降低可以用絮凝和架桥来解释。在混合后(0分钟),该系统表现出低的 $\tau_s$ 值。然后,在静置的头几分钟开始絮凝,水合产物(即ettringite和C-S-H)开始成核并将水泥颗粒结合在一起,因此在静置30分钟后 $\tau_s$ 增加。通过剪切该系统,这种形成的桥被打破。在接下来的30分钟的静

止期间,系统开始以同样的方式重建其结构。然而,大部分的硫酸盐在最初的几分钟内被消耗掉了,因此,只有C-S-H成核物可以与水泥颗粒结合。这种成核发生在新鲜浆料K在90分钟开始凝固时的水化加速之前。因此,在60分钟时得到了较低的 $\tau_S$ 。其他地方也报道了类似的观察结果。对于只用石灰石的粘结剂(KL),也观察到了同样的趋势。然而,使用煅烧过的粘土在30分钟后更大程度地增加了KC和LC3粘合剂的 $\tau_S$ ,并继续增加其值,直到60分钟。在不同的静止时间,每个样品的 $\tau_D$ 几乎保持相等,这证实了当施加足够的剪切力时,结构的建立/破坏是可逆的。当使用煅烧过的粘土时,记录的 $\tau_D$ 值更高。

在静止时间内 $\tau_S$ 增加的不同速率可以揭示出建立/破坏机制的不同。粘合剂(LC3和KC)中煅烧过的粘土的存在导致 $\tau_S$ 随时间增加的速率很高,这表明材料在静止时的结构化速率很高。与KC相比,由于石灰石的存在,石灰石与煅烧粘土的组合降低了粘结剂LC3的 $\tau_S$ 。从结果中可以清楚地看到每种材料、煅烧粘土和石灰石对屈服应力的单独影响。一般来说,与二元煅烧粘土混合物(KC)相比,二元石灰石混合物(KL)在不同的静止时间内显示出较低的 $\tau_S$ 和 $\tau_D$ 差异。

#### 流变学特性:粘弹性

早期的振荡应变扫描显示了所有粘合剂在0分钟时的储存( $G'$ )和损失( $G''$ )模量随应变的变化。可以看出,所有的粘结剂都显示出LVE反应和小幅度变形时的高弹性( $G' > G''$ ),反映了材料的类固体状态或结构化网络。LVE反应的极限是以临界应变( $\gamma_{cr}$ )为特征的,从这个临界应变开始, $G'$ 和 $G''$ 下降,材料开始屈服。在更大的应变下, $G'$ 和 $G''$ 继续减少,直到交叉点,此时 $G' = G''$ ,材料变成液体状,反映出微结构完全崩溃。很明显,所有的粘合剂在相同的 $\gamma_{cr}$ -K: 0.0031%, LC3: 0.0033%, KL: 0.0056%和KC: 0.0030%的范围内开始屈服。然而,相应的 $G'$ 显示了一个单调的增长, K: 5272.4Pa, LC3: 5945.5Pa, KL: 6892.5Pa, KC: 7850.0Pa。 $\gamma_{cr}$ 和 $G'$ 的值取决于颗粒间的相互作用和网络结构。煅烧后的粘土明显增加了颗粒间的结构,并由于絮凝和高水吸附而导致了强大的网络,而它与石灰石的结合则导致了网络形成的减少。

#### 塑性收缩

根据塑性收缩的测量结果,可以观察到,在所有的系统中,波特兰熟料被部分替换的情况下,与颗粒沉降有关的对出血制度中测量的应变的贡献在第一个时间尺

度内增加,并在20分钟左右达到稳定状态,这可能是由于颗粒絮凝和沉降的增强。在干燥体系中,观察到相反的行为,粘结剂K显示出明显的高应变。LC3系统在早期收缩值方面优于K系统,在三小时内测得的应变减少超过2倍。

根据两种配置中测得的应变之间的差异,通过减去与颗粒沉降有关的贡献,可以看到由于蒸发而产生的毛细管应力的唯一贡献。通过比较,可以得出结论,大部分观察到的收缩与这种毛细管压力有关。应变立即增加,波特兰熟料有一个陡峭的梯度,而这种陡峭的增加在其他粘结剂中被延迟了。

塑性收缩过程在以前的研究中提出的机制中得到了例证。浇注后,颗粒由于重力作用而沉降,导致出血层的形成,随后开始蒸发(初始干燥期)。由于出血率较高,对含有单片机的粘合剂来说,观察到的时间较长(超过50分钟)。当蒸发率高于出血率时,脑膜开始在表面形成,并引起毛细压力的增加,导致收缩的开始。在这个阶段,水从孔隙结构内被输送到表面并继续蒸发(恒定速率期)。这个时期在浇注粘结剂K(不含SCMs)后立即或在很短的时间范围内发生,显示出由于快速的毛细管压力发展而产生的显著收缩。然而,SCMs的存在倾向于减少二元和三元体系的塑性收缩期。这表明,在含有SCMs的混合水泥中观察到的早期收缩的减少,可能与孔隙网络的细化有关,它推迟了渗漏层的形成和随后的蒸发。因此,固体网络的比例压实是可以预期的,这是在蒸发下毛细管压力增长时形成的。值得注意的是,在土壤-液体系统中,已经证明收缩是由蒸发率驱动的,而收缩极限是由固体网络压缩性控制的。因此,与普通波特兰粘结剂K相比,含有SCM的粘结剂往往具有更细的孔隙结构,这可以导致更高的毛细管压力阻力,从而降低收缩率。由于持续的蒸发,脑膜进入孔隙结构(临界点),导致颗粒间距离减少。在这一点之后,毛细管压力不再能够压实固体网络,沉降变得可以忽略不计;因此,不再有垂直收缩(下降率期)。

关于塑性收缩和凝固之间的关系,与颗粒沉降有关的部分应变发生在最初的10分钟内,远在初始凝固之前。对于毛细管压力引起的收缩,所有粘结剂的初凝时间都发生在由于持续蒸发而产生的毛细管压力的演变过程中,而粘结剂K在其相应的终凝时间(174分钟)附近接近一个平稳期,但对于其他粘结剂没有观察到明显的相关性,对于这些粘结剂来说,平稳期是在初凝和终凝时间之间的某个时间内达到的。

## 结论

本文概述了二元和三元体系从浇注到凝结的单片机行为。通过维卡针、流变仪和X射线成像对混合水泥(w/s 0.5)进行了评估,以确定凝结时间、流变特性以及新鲜浆料的早期收缩演变。

由于熟料的比例较低,含有SCM的粘结剂具有较高的初凝时间。在二元体系中使用较高的煅烧粘土成分会导致整体的凝结延迟,而用石灰石或石灰石/煅烧粘土替代熟料成分,与参考粘结剂相比,凝结时间延迟较小。在有SCM的情况下,凝结的差异可以用化学平衡、渐进式絮凝和需水量来解释。煅烧粘土的存在增加了颗粒的絮凝,而石灰石的添加则有利于增强新鲜浆料的流动性。流变学测量已经量化了静止(老化)后剪切系统的结构变化。在初凝时间之前,没有SCM的熟料浆料暴露出静态屈服应力和触变指数的意外下降。这归因于颗粒之间通过剪切产生的桥梁断裂(即C-S-H)。因此,相对于触变性的建立(即范德瓦尔斯吸引、静电排斥和立体阻碍),与水合产物相关的结构建立速度要慢得多。在重组过程中,使用高煅烧的粘土部分,颗粒重组的发展明显增加,这导致了强大的网络的形成,而石灰石提供的颗粒网络的重排程度较低,导致结构强度降低。因此,两种单质材料的组合,由于网络相互作用的逐步形成和可逆,平衡了结构的分解/建立过程。新鲜浆料的早期收缩受到蒸发过程中不断增长的毛细管压力的显著影响。在干燥过程中,由蒸发引起的流体部分的表面张力导致了塑性收缩的增加,而其极限则由孔隙结构的细化和单片机产生的压实控制。

本报告不仅对石灰石和煅烧粘土作为OPC的高分量(高达50wt%)替代品进行了定量和定性评估,而且还概述了LC3从浇注到凝固的新鲜状态特性。因此,对LC3的生产、环境可持续性和成本效益的更多研究和测试可以为全球水泥市场提供有效的解决方案。

## 参考文献:

[1] Bouregba, A.; Ez-zaki, H.; Diouri, A.; Sassi, O. Dicalcium silicate hydration behavior in the presence of

Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> and water glass. *Asian J. Civ. Eng.* 2019, 20, 857 - 867.

[2] Ashby, M.F. *Materials and the Environment: Eco-Informed Material Choice*, 1st ed.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands; Butterworth-Heinemann: Oxford, UK, 2009; ISBN 978-1-85617-608-8.

[3] Yang, K.H.; Jung, Y.B.; Cho, M.S.; Tae, S.H. Effect of supplementary cementitious materials on reduction of CO<sub>2</sub> emissions from concrete. *J. Clean. Prod.* 2015, 103, 774 - 783.

[4] Miller, S.A. Supplementary cementitious materials to mitigate greenhouse gas emissions from concrete: Can there be too much of a good thing? *J. Clean. Prod.* 2018, 178, 587 - 598.

[5] Marangu, J.M. Physico-chemical properties of Kenyan made calcined Clay -Limestone cement (LC3). *Case Stud. Constr. Mater.* 2020, 12, e00333.

[6] Scrivener, K.; Martirena, F.; Bishnoi, S.; Maity, S. Calcined clay limestone cements (LC3). *Cem. Concr. Res.* 2018, 114, 49 - 56.

[7] Cancio Díaz, Y.; Sánchez Berriel, S.; Heierli, U.; Favier, A.R.; Sánchez Machado, I.R.; Scrivener, K.L.; Martirena Hernández, J.F.; Habert, G. Limestone calcined clay cement as a low-carbon solution to meet expanding cement demand in emerging economies. *Dev. Eng.* 2017, 2, 82 - 91.

[8] Scrivener, K.; Dekeukelaere, A.; Avet, F.; Grimmeissen, L. *Financial Attractiveness of LC3*; École Polytechnique Fédérale de Lausanne: Lausanne, Switzerland, 2019.

[9] Nickovic, S.; Vukovic, A.; Vujadinovic, M.; Djurdjevic, V.; Pejanovic, G. Technical Note: High-resolution mineralogical database of dust-productive soils for atmospheric dust modeling. *Atmos. Chem. Phys.* 2012, 12, 845 - 855.

[10] Joseph, S.; Bishnoi, S.; Maity, S. An economic analysis of the production of limestone calcined clay cement in India. *Indian Concr. J.* 2016, 90, 22 - 27.