

碱活化砌块生态住宅原型建设的设计、 施工和对环境的影响

红宝石瓦伦西亚-萨维德拉, 阿曼多·罗巴约-萨拉查, 桑德拉·梅加-古铁雷斯, 威廉·拉米雷斯-贝纳维德斯
隶属机构: 哥伦比亚大学材料工程学院

摘要: 建筑行业对碱活化材料的兴趣已经增加, 以至于这些材料被认为是寻求可持续建筑的普通波特兰水泥基材料的替代品。本文介绍了使用碱活化技术或地质聚合生产的混凝土块建造的生态友好型房屋原型的设计和建造。该原型符合现行哥伦比亚抗震建筑法规(NSR-10)的要求, 并包括与一层或两层建筑的抗震密闭砌体的材料性能、设计和施工方法相关的标准。碱活化块由不同的前体(铝硅酸盐)获得, 包括天然火山灰、磨碎的高炉矿渣、粉煤灰、建筑和拆除废物(混凝土、陶瓷、砖和砂浆)和红粘土砖废物。碱活化块的物理机械特性允许它们根据哥伦比亚技术标准NTC 4026(相当于ASTM C90)的结构规范进行分类。归因于碱活化砌块原材料的全球变暖潜能值(GWP)或“碳足迹”低于(25.4-54.7%)参考砌块(普通硅酸盐水泥混凝土砌块)。这些结果证明了碱活化材料在建造生态友好型房屋中的应用潜力。

关键词: 碱活化材料; 地质聚合物; 混凝土块; 砖; 环保房屋; 可持续建筑; 废物回收

Design, Construction and Environmental Impact of Eco-House Prototype Construction with Alkali-Activated Blocks

Ruby Valencia-Saavedra, Armando Robayo-Salazar, Sandra Mejia-Gutierrez, William Ramirez-Benavides
Affiliation: School of Materials Engineering, Columbia

Abstract: The interest of the construction industry in alkali-activated materials has increased to the extent that these materials are recognized as alternatives to ordinary Portland cement-based materials in the quest for sustainable construction. This article presents the design and construction of a prototype of an eco-friendly house built from concrete blocks produced using alkali activation technology or geopolymerization. The prototype meets the requirements of the current Colombian Regulations for Earthquake Resistant Buildings (NSR-10) and includes standards related to the performance of the materials, design, and construction method for earthquake-resistant confined masonry of one- or two-story buildings. The alkali-activated blocks were obtained from different precursors (aluminosilicates), including a natural volcanic pozzolan, ground granulated blast furnace slag, fly ash, construction and demolition waste (concrete, ceramic, brick, and mortar), and red clay brick waste. The physical-mechanical characterization of the alkali-activated blocks allowed their classification according to the structural specifications of the Colombian Technical Standard NTC 4026 (equivalent to ASTM C90). The global warming potential (GWP) or “carbon footprint” attributed to the raw materials of alkali-activated blocks was lower (25.4–54.7%) than that of the reference blocks (ordinary Portland cement concrete blocks). These results demonstrate the potential of alkali-activated materials for application in the construction of eco-friendly houses.

Keywords: Alkali-activated material; geopolymer; concrete block; brick; eco-friendly house; sustainable construction; waste recycling

引言:

寻找可促进环境持续性的新兴技术是建筑部门的优先事项;该部门是全球污染指数的主要贡献者之一。这一问题已在“联合国大会2030年可持续发展议程”和“17个可持续发展目标”的框架内确定。根据联合国(UN)的数据,由指数级人口增长推动的快速城市化将导致到2030年的住房需求增加60%,使城市成为全球75%的碳排放源。同样,到2050年,估计需要增加相当于近三个行星价值的自然资源来维持当前的生活方式。由于这些原因和其他原因,联合国成员国提出了“可持续城市”模式的方法和紧急实施方案。该模型提出可持续消费和生产,寻求将经济增长与环境退化脱钩,提高资源效率,减少原材料的提取和产生的废物的最终处置(“零废物”方法),并走向绿色(循环)低碳排放经济体。

近几十年来,碱活化或地质聚合技术引起了科学和建筑部门的关注,这主要是由于具有较低“碳足迹”或全球变暖潜势的普通波特兰水泥(OPC)基的材料替代品的可能性(GWP)并具有卓越的机械和耐用性能,生命周期分析(LCA)重新获得重视。此外,碱活化技术有利于利用各种工业废物或副产品,如硅铝酸盐材料来获得碱活化材料和地质聚合物。

这些材料是通过铝硅酸盐(前体)和强碱性溶液(碱性活化剂)之间的相对低温(25-100℃)物理化学相互作用获得的,这会导致反应产物沉淀:水合铝硅酸钠(N-A-S-H)凝胶(差钙)和/或“混合”C-(N)-A-S-H凝胶(富含钙),具有出色的粘合和结合特性。这些碱活化材料可用于各种产品,例如砂浆、混凝土和建筑构件(预制),例如砖和混凝土块。

在砌块和砖的生产中使用碱活化材料已得到多位作者的验证,例如Gavali等人 and Deraman 等人的评论,其中飞灰(FA)是这些研究中最常见的主要前体。事实上,Ariöz等人通过优化60℃下24小时的热固化过程,通过FA的碱性活化(NaOH + Na₂SiO₃)生产了抗压强度在5到60 MPa之间的地质聚合物砖。Gavali和Ralegaonkar报道了由80%稻壳灰和20%FA组成的混合物的碱性活化(NaOH + Na₂SiO₃)生产实心砖,其中石粉作为填料(前体/填料比为1:1, 1:2和1:3(按重量计))。砖的抗压强度(28天)在5到15 MPa之间,吸收值在6到14%之间。在一项补充研究中,Gavali和Ralegaonkar提出用这些碱活化砖设计生态住宅。但是,没有报道他们的建造过程。Huynh等人以及Hwang和Huynh强调了在碱活化块(NaOH)中用FA替代稻壳灰

(10-50%)的可能性,报告了10%的最佳替代率,这与Maulana等人报告的结果一致。Poinot等人能够从由70%FA、20%粘土和10%熟石灰(作为钙源)组成的混合物中获得28天强度在11到15 MPa之间的碱活化砖(NaOH)。

Venugopal等人用FA(80%)和粒状高炉矿渣(GBFS)(20%)(作为钙的来源)的混合物制造了碱活化砖(实心 and 空心)。在这些混合物中,NaOH和Na₂SiO₃用作碱性活化剂和细骨料,FA-GBFS/砂的比例为1:1(按重量计)。砖的物理机械特性产生的抗压强度介于5(3天)和25(28天)MPa之间,吸收值(28天)介于8.2和9.1%之间。Mohammed等人报道了基于FA活化的地质聚合物空心砖的生产,其中NaOH和Na₂SiO₃的混合物和粒状橡胶作为骨料(FA/橡胶比1:1(按重量计)),抗压强度(28天)达到3.98 MPa,吸收值为25.2%。

在碱活化砖或块的生产中用作主要前体或钙源(添加)的另一种副产品是GBFS。事实上,Ren等人报道了基于GBFS的碱活化块(NaOH + Na₂SiO₃)的合成和物理机械表征,其中部分替代了废混凝土粉末(按重量计20、40和60%)和回收的细骨料(按重量计0、25、50、75和100%)。抗压强度的结果显示值在15和60 MPa之间,具体取决于混凝土粉末和再生细骨料的含量,吸收值在13和25%之间。Ahmari和Zhang展示了使用铜尾矿生产抗压强度高达15 MPa且吸收值低于5%的碱活化砖(NaOH)的潜力,这是通过优化压实压力和固化温度来实现的。Chen等人使用循环流化床燃烧产生的底灰作为碱活化地质聚合物砖的前驱体,采用NaOH和Na₂SiO₃溶液,固化7天和28天时的抗压强度值分别为16.1和21.9 MPa。

所有结果表明,从技术和物理机械的角度来看,在碱活化砖或砌块的生产中使用碱活化技术的可能性。关于减少与此应用相关的“碳足迹”(环境影响)的潜力,一些作者报告了有希望的结果。Apithanyasai等人评估了使用70:30:0、60:30:10、50:30:20和40:30:30%比例的废铸造砂、FA和电弧炉渣混合物的潜力(按重量计)作为地质聚合物砖的前体,用NaOH和Na₂SiO₃溶液活化。对应于40:30:30比例的最佳混合物产生25.8 MPa的抗压强度。作者强调,这种碱活化砖对环境的影响低于OPC混凝土砌块。同样,Dahmen等人基于高岭土的碱性活化(NaOH + Na₂SiO₃)对块进行了LCA,表明这种类型的块的碳足迹(GWP)为1.03 kg CO₂ eq/块,比环境高41.5%比OPC混凝土块(1.76千克

二氧化碳当量/块)更友好。

这篇文章是对越来越多的与碱活化材料的开发相关的出版物的补充,强调了它们在生产环保结构砌块中的应用潜力,这些砌块适用于建造满足所有结构的一层和二层建筑。和抗震规格。在原材料中,使用了各种类型的前驱体(硅铝酸盐),如FA、GBFS、天然火山灰(NP)、建筑和拆迁废料(混凝土、陶瓷、砂浆和砖废料)(CDW)和烧制红粘土废砖(熟料)(RCBW)。此外,还使用了来自CDW的再生骨料(细骨料和粗骨料)。这项研究与之前由Universidad del Valle(Cali-Colombia)的复合材料小组在碱活化和地质聚合研究系列中开展的几项研究具有连续性。在这些先前的研究中,定义了每种地质聚合物混合物的碱性活化剂(NaOH + SS + 水)和前体(NP-GBFS; FA; CDW; RCBW)的含量。

本文的目的是证明碱活化材料在生产用于建造环境可持续住房的砌块中的应用潜力,符合技术标准和建筑法规规定的所有物理机械规范,以保证其结构性能和哥伦比亚的抗震(或抗震)能力。此外,生态房屋原型代表了未来研究的一个有趣和高潜力的对象,这将与热测量(舒适度)和长期耐久性有关。

一、生态屋原型设计

这一阶段的目的是验证使用这些不同替代材料的潜力,采用相同的施工方法和传统材料的相同性能要求,同时考虑到用碱活化块建造生态房屋在本文之前没有报道过。因此,生态住宅原型的建筑和结构设计是按照NSR-10一到二层抗震住宅的规范建立的。

房屋原型有代表主房间的空间,与浴室、厨房和客厅相结合,建筑面积为8.36平方米。生态屋原型的自由高度设定在最高点(山脊)1.3 m。考虑到通风和亮度,窗户被放置在房子的前面和后面,这保证了热舒适和房子内自然光的使用。屋顶设计为“山墙”屋顶,坡度分别为29%和24%,以方便水的收集和使用。在房子周围,设计了一个平台,从每面墙突出50厘米。

生态住宅是围绕一个抗震系统设计的,该系统能够保证对垂直和水平载荷的充分响应。基础系统的设计旨在保证载荷从结构到地面的整体和平衡传输,系统的刚度足以避免差异沉降。基础是25x25平方厘米的连续OPC混凝土系梁所组成的网状系统。纵向钢筋由四根直径为12.7毫米的波纹钢筋(钢筋)组成,并用间距为15厘米的9.5毫米直径的箍筋进行加固。最小混凝土覆盖面设定为50毫米。基础浇筑在60毫米厚的硬填料层上。混凝土地板托梁对应于10x20平方厘米的矩形OPC混凝土梁。纵向钢筋由四根直径为9.5毫米的波纹钢筋组成,

并由间距为15厘米的直径为6.4毫米的箍筋限制。

对于封闭砌体墙的设计,根据先前生产的砌块尺寸确定了10 cm的壁厚和1.1 m的自由高度。这些块由OPC混凝土柱和混凝土系梁所限制。限制柱设计为矩形尺寸为10x20 cm²,自由高度为1.1 m。钢筋由四根直径为9.5毫米的纵向波纹钢筋组成,用直径6.4毫米的箍筋和10厘米的间距限制。约束柱的钢筋下部锚固到钢筋基础上,上部锚固到钢筋混凝土系梁上,以保证结构的整体性能。约束梁对应于10x20 cm²的矩形梁。钢筋由四根9.5毫米的纵向波纹钢筋组成,由直径6.4毫米、间距10厘米的箍筋约束。混凝土系梁的钢筋(约束)以90°角锚固在末端。这些矩形钢筋混凝土梁与屋顶水平齐平,形成封闭的环以互锁墙壁。

混凝土系梁和门楣是OPC混凝土构件,方形截面为10x10 cm²,用两根直径9.5 mm的波纹钢纵向钢筋加固,由间距为15 cm的6.4 mm螺旋(S形)箍筋限制。为了保证结构的整体性能,钢筋被锚定在连接元件上。

二、生态住宅原型的建造

根据上面介绍的结构和建筑设计,生态住宅原型的建造是在Universidad del Valle(加利福尼亚-哥伦比亚)的校园内进行的,特别是在材料工程学院的后面区域(E44楼)。在施工的前期工作中,根据结构图和NSR-10第E.6.2.1节的规定,进行了地形适应和轴线布置。随后,按照结构图中规定的尺寸开挖了地基。一旦从底部移除开挖土壤,根据NSR-10的E.6.2.2部分浇筑60毫米厚的硬填料层。

考虑到NSR-10的E.6.2.3部分,组装了连接基础梁的加强柱的钢结构。钢筋安装在硬质填料上,每侧留出50毫米的自由空间用于混凝土覆盖。弯曲90°的钩子放置在终端横向元件的外表面上,并在纵向钢筋上放置45厘米的重叠。一旦基础的钢就位,钢筋柱就被固定和锚固。经验证,钢材的布局符合结构图的规范,因此组装模板,最后用OPC混凝土连续浇筑梁,以保证整体系统。地基固化后,按照设计规范进行混凝土楼板托梁的配置和浇筑。梁之间形成的矩形空间填充了充分压实的天然土壤,在零水平面上留下了70毫米的自由高度,用于浇筑地板。用电焊网加固的70毫米厚的混凝土底层护板浇筑在填充物上,该网具有15x15平方厘米的方形开口和4毫米的钢筋直径。

封闭砌体墙的施工按照NSR-10第E.6.3.1节的规定进行。总共使用了53块NP-GBFS、165块FA、120块CDW、217块RCBW和303块OPC用于建造受限砌体墙。砌块预先润湿(预饱和)并用水泥/沙子比为1:3和2

厘米厚的标准 OPC 砂浆凝固。每面墙的配置使得砌块的垂直接头互锁，留下随后铸造限制柱所需的空。在窗户的下限处，根据设计规范浇筑了 OPC 混凝土过梁。门楣固化后，继续建造墙体，直到达到规定的高度。

约束砌体墙建成后，在养护过程之后，浇筑钢筋 OPC 混凝土的约束柱和混凝土系梁。约束柱的竖向钢筋使用一直延伸到约束梁顶部的 90° 吊钩完成，作为预防措施，在 50 毫米涂层吊钩的顶部留有自由空间。连续进行约束柱和混凝土系梁中的 OPC 混凝土浇筑，使混凝土接触约束墙的终端表面。

在约束元件的 OPC 混凝土固化后，使用结构设计中为每面墙选择的相同类型的砌块在混凝土系梁上建造砌体对接接头。在形成对接接头的砌块上，根据建筑设计浇筑混凝土系梁。在混凝土系梁上，放置了尺寸为 76x38 mm² 的矩形钢结构梁，以支持覆盖物或屋顶的安装。屋顶设计为双坡屋顶，采用未增塑聚氯乙烯 (UPVC) 瓷砖。瓷砖从墙壁边缘突出，水平投影为 30 厘米。

最后，为了建造平台，在每面墙的前面浇筑了 10x20 平方厘米的矩形混凝土梁，正面与每侧的混凝土地板托梁相距 50 厘米。在平台内部空间 (50 cm 宽) 上方，14 个 NP-GBFS 块、8 个 FA 块、20 个 CDW 块、38 个 RCBW 块和 26 个 OPC 块被随机放置成摊铺机形状。在“摊铺机”之间留下的开口或空间之间倒入 OPC 混凝土混合物。安装聚氯乙烯 (PVC) 天花板后，对建筑进行了美学处理，呈现出生态住宅的外观。

三、环境影响评估

使用全球变暖潜势指标 (GWP) 进行与碱活化混合物相关的环境影响的估计，该混合物由其生产砌块并最终建造生态房屋原型。对于库存分析，使用了 Eco invent 3.6 数据库。功能单元是 1 立方米的碱活化混凝土混合物 (NP-GBFS、FA、CDW 和 RCBW)。将碱活化混合物的碳足迹分析与基于 OPC 的参考混合物的碳足迹分析进行比较。

根据对用于生产混合物和块的每种原材料的每千克 CO₂ 排放量 (GWP: kg CO₂ eq) 的检查，NaOH、OPC 和 Na₂SiO₃ 依次是最高的原材料 CO₂/kg 排放量。因此，预计这些材料含量较高的混合物设计将具有较大的碳足迹；也就是说，每种混凝土的环境影响最终将取决于混合物的设计。另一方面，前体 (NP、GBFS、FA、CDW 和 RCBW) 的 GWP 显著低于 OPC。

关于与碱性活化剂 (NaOH 和 Na₂SiO₃) 相关的高碳足迹 (CO₂/kg)，这些化学试剂基于天然原材料，涉及

能源成本高、二氧化碳排放量高的工业过程。氢氧化钠 (NaOH) 主要通过电解方法使用氯化钠水溶液制备。硅酸钠 (Na₂SiO₃) 最初是通过混合碳酸钠 (Na₂CO₃) 和二氧化硅 (SiO₂) 获得的。然后，将混合物在 1100 到 1200 摄氏度之间的温度范围内浇铸，产生无定形固体。然后将产品引入高压釜中，经受高压，并在与水接触时产生一种称为“水玻璃”的水溶液。事实上，处理硅酸钠需要高温，大大增加了含有这种类型活化剂的碱活化材料的碳足迹。因此，碱活化技术的关键之一是基于替代来源合成活化剂和硅酸钠，以生产更环保的碱活化材料。

通过将原材料的排放清单 (kg CO₂ eq) 应用于混合物的设计或比例，计算了与原材料相关的每种类型区块的每立方米碳足迹。请注意，与 OPC 混合物报告的 344.5 kg CO₂ eq/m³ 相比，NP-GBFS、FA、CDW 和 RCBW 混合物的碳足迹分别为 155.9、240.5、220 和 257 kg CO₂ eq/m³。结果代表了建造的生态房屋原型的环境可持续性方面的重要发现，因为这些 GWP 值与其建造和使用的砌块的碳足迹成正比。与基于 OPC 的参考块所相关的碳足迹相比，减少了 25.4-54.7%。作为与原材料排放相关的每单位 (块) 碳足迹的近似值，每种混合物的每立方米 GWP 除以 625 (1 立方米混合物的产量以 0.0016 立方米的矩形块为单位表示)。相对于 OPC 的 0.55 kg·CO₂·eq/block 堵塞。

结论

本文展示了碱活化材料在生产用于建造环境可持续住房的砌块中的应用潜力，符合技术标准和建筑法规规定的所有物理机械规范，以保证其结构性能和抗震 (或抗震)) 反抗。生态住宅原型代表了未来研究的一个有趣和高潜力的对象，这将与热测量 (舒适性) 和碱活化块的长期耐久性有关。从实验结果及其各自的分析可以得出以下结论：

(一) 碱活化技术或地质聚合是一种可持续的方法，它使用各种类型的铝硅酸盐 (前体)，包括天然火山灰 (NP)、粒状高炉矿渣 (GBFS)、粉煤灰 (FA)、建筑和拆除废物 (CDW) (混凝土、陶瓷、砂浆和砖废料) 和红粘土砖废料 (RCBW)。请注意，后者是工业副产品或废物，由于其广泛产生和管理不善，在世界范围内被视为环境问题。从这个意义上说，使用这种类型的废物进行碱性活化被提议作为一种综合替代方案，也是在建筑行业实施“循环经济”的一种方法。

(二) 生产的碱活化砌块符合哥伦比亚技术标准 (NTC) 规定的所有物理机械规格，被归类为结构砌体

的混凝土单元。NP-GBFS (31.4 MPa)、FA (23.9 MPa)、CDW (26.1 MPa) 和 RCBW (17.0 MPa) 块和参考 OPC 块 (22.7 MPa) 的抗压强度 (28 天) 超过了规定的最低限度根据 NTC 4026 (相当于 ASTM C90) 的结构分类 (低级 8 MPa 和高级 13 MPa)。

(三) 生态住宅原型的建筑和结构设计以及建造过程均符合哥伦比亚一层和两层住宅抗震建筑法规 (NSR-10) 的所有规范。

(四) 结果表明, NaOH ($1.46 \times 100 \text{ kg} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{eq}$)、OPC ($8.45 \text{ 10}^{-1} \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$) 和 Na_2SiO_3 ($8.12 \text{ 10}^{-1} \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$) 依次是在所有使用的原材料中, CO_2/kg 排放量最高。然而, 碱活化块的碳足迹最终取决于混合物的设计或这些材料的比例。从这个意义上说, 碱活化块的碳足迹比基于 OPC 的参考块低 25.4–54.7%。实际上, NP-GBFS、FA、CDW 和 RCBW 混合物的全球变暖潜势 (GWP) 值分别为 155.9、240.5、220.0 和 257.0 $\text{kg CO}_2 \text{ eq}/\text{m}^3$, 而 GWP 为 $344.5 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}/\text{m}^3$ 的 OPC 混合物。对于砌体单元 ($625 \text{ 个混凝土块}/\text{m}^3$), 与 NP-GBFS、FA、CDW 和 RCBW 块的原材料相关的 GWP 值分别为 0.25、0.38、0.35 和 0.41 kg CO_2 当量/块, 与 OPC 块产生的 0.55 千克二氧化碳当量/块相比。通过在 GWP 计算中包括原材料的运输, 尽管数值增加了 23%, 但碱活化块的总 GWP 低于参考块的总 GWP。

(五) 总之, 该研究表明了利用工业副产品和废物 (GBFS、FA、RCBW、RCD) 作为原材料生产具有低环境足迹和适合建造房屋特性的碱活化砌块的可行性, 符合施工规范的规定。这种选择符合循环经济的原则。未来的研究应侧重于评估原型的热性能和耐久性。

参考文献:

[1]Robayo-Salazar, R.A.; Mejía-Arcila, J.M.; Mejía de Gutiérrez, R. Eco-Efficient Alkali-Activated Cement Based on Red Clay Brick Wastes Suitable for the Manufacturing of Building Materials. *J. Clean. Prod.* 2017, 166, 242 - 252.

[2]Hassan, A.; Arif, M.; Shariq, M. Use of Geopolymer Concrete for a Cleaner and Sustainable Environment—A Review of Mechanical Properties and Microstructure. *J. Clean. Prod.* 2019, 223, 704 - 728.

[3]Rizzuto, J.P.; Kamal, M.; Elsayad, H.; Bashandy, A.; Etman, Z.; Aboel Roos, M.N.; Shaaban, I.G. Effect of Self-Curing Admixture on Concrete Properties in Hot Climate

Conditions. *Constr. Build. Mater.* 2020, 261, 119933.

[4]ACI Committee 318. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08); American Concrete Institute (ACI): Farmington Hills, MI, USA, 2008.

[5]Resolución No. 0472 de 2017, Reglamento Para La Gestión Integral de Los Residuos Generados En Las Actividades de Construcción y Demolición—RCD (“Regulation for the Management of Wastes Generated in Construction and Demolition Activities”); Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible: Bogotá, Colombia, 2017.

[6]Swiss Centre for Life Cycle Inventories Ecoinvent OpenLCA Database Version 3.6. Available online: <https://www.ecoinvent.org/database.html>

[7]De Moraes Pinheiro, S.M.; Font, A.; Soriano, L.; Tashima, M.M.; Monzó, J.; Borrachero, M.V.; Payá, J. Olive-Stone Biomass Ash (OBA): An Alternative Alkaline Source for the Blast Furnace Slag Activation. *Constr. Build. Mater.* 2018, 178, 327 - 338.

[8]Kamseu, E.; Beleuk à Mougam, L.M.; Cannio, M.; Billong, N.; Chaysuwan, D.; Melo, U.C.; Leonelli, C. Substitution of Sodium Silicate with Rice Husk Ash-NaOH Solution in Metakaolin Based Geopolymer Cement Concerning Reduction in Global Warming. *J. Clean. Prod.* 2017, 142, 3050 - 3060.

[9]Mejía, J.M.; Mejía de Gutiérrez, R.; Montes, C. Rice Husk Ash and Spent Diatomaceous Earth as a Source of Silica to Fabricate a Geopolymeric Binary Binder. *J. Clean. Prod.* 2016, 118, 133 - 139.

[10]Puertas, F.; Torres-Carrasco, M. Use of Glass Waste as an Activator in the Preparation of Alkali-Activated Slag. Mechanical Strength and Paste Characterisation. *Cem. Concr. Res.* 2014, 57, 95 - 104.

[11]Villaquirán-Cacedo, M.A.; Mejía de Gutiérrez, R.; Sulekar, S.; Davis, C.; Nino, J.C. Thermal Properties of Novel Binary Geopolymers Based on Metakaolin and Alternative Silica Sources. *Appl. Clay Sci.* 2015, 118, 276 - 282.

[12]Scrivener, K.L.; John, V.M.; Gartner, E.M. Eco-Efficient Cements: Potential Economically Viable Solutions for a Low- CO_2 Cement-Based Materials Industry. *Cem. Concr. Res.* 2018, 114, 2 - 26.