

# 用于水泥基板材生产的新型加固材料的研究

托尼·佩雷拉·门德斯, 朱莉安娜·雷森德·维亚纳

所属单位: 巴西工程部

**摘要:** 使用新型原材料开发建筑材料是目前社会和行业的需求。其目的是为了降低生产成本, 改善性能, 并获得越来越多的可持续发展过程和产品。在这方面, 这项工作旨在评估新型加固材料对水泥基板材的物理机械和热性能的影响。作者对用松木、咖啡壳废料、稻壳和聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 加固的水泥基板材进行了评估。这些板材是以  $1.30\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  的名义密度; 1: 2.5 的加固材料: 水泥比例; 1: 1.5 的水: 水泥比例; 0.25 的水泥水化率, 使用波特兰 ARIV 水泥和 3% 的氯化钙 ( $\text{CaCl}_2$ ) 作为添加剂。在加速老化之前和之后, 作者对板材的物理、机械和热性能进行了评估。PET 瓶废料显示出用于水泥基板材生产的巨大潜力, 获得了最好的物理和机械结果, 并显示出优于松木板材的性能。用咖啡壳和稻壳废料加固的水泥基板材获得了较低的物理机械性能, 呈现出使用上的局限性, 然而, 其热导率值最低。

**关键词:** 废弃物; 复合材料; 农用工业废弃物; 物理机械性能; 导热性; 耐用性

## Study of New Reinforcing Materials for Cementitious Panel Production

Tony Pereira Mendes, Juliana Rezende Viana

Affiliation: Department of Engineering, Brazil

**Abstract:** The development of building materials using new types of raw materials is currently on demand by society and the industry. It is intended to reduce production costs, improve properties and obtain ever-increasingly sustainable processes and products. In this respect, this work aimed to evaluate the effect of new types of reinforcement material on the physical-mechanical and thermal properties of cement-based panels. Cement-based panels reinforced with pine wood, coffee husk waste, rice husk and polyethylene terephthalate (PET) were evaluated. The panels were produced with  $1.30\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  nominal density; 1:2.5 reinforcement material: cement ratio; 1:1.5 water:cement ratio; 0.25 cement hydration rate using Portland ARI V cement and 3% calcium chloride ( $\text{CaCl}_2$ ) as additive. The panels' physical, mechanical and thermal properties were evaluated before and after accelerated aging. PET bottle wastes showed great potential for use in cement-based panel production, obtaining the best physical and mechanical results, and showing superior performance to pine wood panels. Cement-based panels reinforced with coffee husk and rice husk waste obtained lower physical-mechanical performance, presenting usage limitations, however, with the lowest values of thermal conductivity.

**Keywords:** Waste; Composites; Agroindustrial waste; Physical-mechanical properties; Thermal conductivity; Durability

### 引言:

能源和环境问题是全球可持续发展视角下的主要关切。住房部门尤其是能源密集型的。它是一个主要的温室气体排放者和自然资源的消费者。在这种情况下, 科学界重新评估了建筑材料的性能, 其依据是内含能源和环境影响。根据 Constatinos 等人的研究, 在 1990-2000 年这十年间, 欧洲新建筑的更好设计使建筑能耗降低了

0.4%, 而人口增长了 0.9%。这种改善在很大程度上是由于使用了更多的节能材料和设备, 以及设计规范的演变。

与水泥基质相结合的生物源材料为传统建筑材料提供了一个有趣的替代方案。它们构成了一个有趣的经济和生态解决方案。生物材料, 如木纤维, 可以从回收的木材或可持续管理的森林中获取。它们的生产成本很低, 而且对环境友好。它们可以在建筑中封存碳。它们通常

是高度多孔的, 具有低表观密度和以多尺度多孔性为标志的复杂结构。这些几何特征导致其具有较高的吸收声音的能力, 并具有湿热传递能力。它们的导热性能接近于发泡聚苯乙烯和玻璃棉。因此, 天然资源的使用为改善建筑环境的热和声舒适度以及开发新的建筑技术提供了真正的可能性。此外, 它们还适合于模块化施工。它们很适合在温暖潮湿的环境中使用, 因为那里的白蚁和腐烂会造成严重的问题。

因此, 引人注目的环境问题、全球对自然资源枯竭的日益认识, 使人们对生物复合材料产生了特别的兴趣, 并需要探索它们在结构上的应用。Reis研究了天然纤维增强的环氧聚合物混凝土的机械性能。椰子、甘蔗渣和香蕉纤维被使用, 因为它们无需任何形式的准备。在这三种纤维中, 切碎的椰子纤维被发现是聚合物混凝土的一个很好的加固物, 增加了断裂和弯曲性能。Corinaldesi等人用木材和木材加工行业的副产品代替了天然砂, 以生产轻质砂浆, 通过压缩和弯曲试验、干燥收缩、抗水蒸气渗透性、毛细管吸水和热导率测量来描述其特征。为了避免机械强度的过度损失和导热性的降低, 作者建议使用最多5%的木材副产品。Morales-Conde等人介绍了木材-石膏复合材料的物理和机械性能的实验特征的结果。使用的添加剂包括不同比例的木屑和来自混合木材废料的锯末。这项研究的结果表明, 增加木材废料的数量可以降低密度并略微降低导热性。除了木制品之外, 在建筑中使用回收的塑料废料制造轻质混凝土的可能性, 也是近年来一些研究的主题。

重建的木板是由处于不同分解阶段的木材生产的, 它由粘合剂或其他类型的粘合剂(如水泥)粘合, 并通过在控制温度下施加足够的压力来巩固。在不同类型的面板中, 主要用于建筑业的木质水泥被强调, 用于天花板、墙壁、隔板、密封、地板等。由于建筑业的扩张, 水泥基板材的使用一直在增加, 因此, 对原材料的需求也在增加, 不仅需要扩大针叶类物种的种植面积, 如松属, 还需要寻找新的原材料选择。鉴于全球对固体废物的产生、处理和储存的关注, 生产部门对原材料的需求, 加上可持续发展的概念, 促使科学家们寻求工业和农业废物的替代品。在潜在的原材料中, 农业废弃物, 如咖啡壳和稻壳, 因其产量大且是世界上的大宗商品而脱颖而出。根据巴西咖啡行业协会(ABIC), 在2019年, 全世界大约生产了1010万吨咖啡, 产生了大约455万吨咖啡壳废物。对于稻壳, 2019-2020年收获的世界产量为4.978亿吨, 产生了近9960万吨稻壳。根据Mendes等人的说法, 将农业废弃物用于复合生产, 除了提供附加值

和充分使用外, 还有助于满足工业需求, 降低生产成本, 使其成为经济形势下更具竞争力的部门。工业废弃物是环境辩论中被提及最多的问题之一。各种研究都集中在这些材料的产生、收集、处置和回收方面。

在工业废物中, 聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)大部分被发现于垃圾填埋场, 需要多年才能分解。近年来, 由于其特性和潜在的应用, PET的使用量有所增加, 2017年, 全球生产了约2780万吨。根据巴西PET行业协会-ABIPET, 巴西的PET回收是最发达的之一; 现有数据显示, 回收量增长了12%, 因此, 能够收集和妥善处理33.1万吨的PET废料。ABIPET在巴西开展的PET回收普查显示, 巴西使用的55%的PET被回收利用。尽管巴西是世界上最大的PET回收国之一, 但仍有45%的PET没有被回收, 导致消费后的垃圾填埋造成严重的环境问题, 并成为登革热、寨卡和基孔肯雅等疾病的来源。尽管对添加颗粒或纤维的水泥基复合材料生产进行了研究, 但仍需要进一步研究, 以更好地了解使用不同类型的废物对其物理、机械、热和耐久性能的影响。因此, 这项工作旨在评估使用咖啡壳、稻壳和PET废料作为水泥面板的增强剂, 寻求了解它们在加速老化前后对物理、机械和热性能的影响。

#### 材料和方法

松木、咖啡壳、稻壳和聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)废料被用于水泥基板材生产。本研究使用的废物是根据重要的生产量来选择的。选择松树木材是因为它目前被用于在工业规模上制作产品。Pinus oocarpa来自位于巴西米纳斯吉拉斯州Lavras市的一个实验种植园, 树龄18年, 直径0.57米(高1.3米)。咖啡壳是从阿拉伯咖啡豆的干燥过程中获得的, 稻米壳是从Oryza sativa L品种的稻米的脱壳过程中获得的, 两者都是从位于巴西米纳斯吉拉斯州拉夫拉斯市的食品加工厂获得的。PET的颗粒来自位于巴西圣保州圣卡洛斯市的一家回收公司。PET来自于有选择的家庭收集, 随后对材料进行清洗和研磨。砍伐后, 松树被切成原木, 并切割成圆盘, 以确定木材的基本密度和化学及解剖学分析。原木在60℃的水箱中加热18小时, 随后进行层压以获得2毫米厚的单板。层压废料被提交到锤式粉碎机中, 以制成木材颗粒。

不同类型的木质纤维素和工业材料在锤式粉碎机中进行加工, 以使颗粒大小均匀化。用于水泥基板材生产的材料是通过2毫米筛子并保留在0.64毫米筛子中的材料。木质纤维素加固材料的基本密度是根据Associação Brasileira de Normas Técnicas 2003标准确定的。PET的密

度是根据 ASTM D1895 标准确定的。颗粒的直径和长度是使用 ImageJ 软件从 SEM 图像中获得的, 每个样品至少有 50 次测量。纤维度指数是通过长度除以颗粒的直径来计算的。对木质纤维素材料的化学分析进行了一式四份的检测。化学成分是根据材料的干质量进行量化的。对木质纤维素材料进行化学定性, 以量化灰分含量、提取物、木质素、全纤维素、纤维素和半纤维素(通过全纤维素和纤维素含量之间的差异进行量化)。对于板材的生产, 最初计算了木质纤维素材料或工业废料颗粒、波特兰水泥 ARI V、水和氯化钙( $\text{CaCl}_2$ ) 化学添加剂的数量。使用的方法是基于 Mendes 等人的。

经过适当的称重后, 将各组分在混凝土搅拌机中混合均匀。为了更好地分散在混合物中, 喷洒了水。当所有材料都被均匀化, 获得一致的质量时, 就获得了最佳混合点。在材料混合过程中使用了为每种处理方法计算的所有水量。每块板的砂浆都经过适当的称重, 分离并分布在涂油的铝板上, 以方便压制和装订后的板块拆除。在铝板上放置 15 毫米厚的铁条, 以控制面板的尺寸和厚度, 然后再叠加另一块铝板。这个过程一式三份, 因此, 每次压制都会得到三块面板。每种类型的加固材料都产生了六块尺寸为 48 厘米  $\times$  48 厘米  $\times$  1.5 厘米(长、宽和厚度分别)的面板。这些面板在室温下以 4 兆帕的压力被压制。压力被施加到面板的床垫达到分离器的厚度, 然后, 进行装订。面板保持订书机 24 小时。之后, 钉子被移除, 面板被小心翼翼地堆放在分离器上, 以确保 28 天的均匀干燥, 直到最终固化。

## 结果和讨论

### 补强材料的物理、化学和几何特征

PET 颗粒的平均密度值最高, 其次是松木。咖啡壳获得的平均密度值最低。AL-Oqla 等人以及 Miao 和 Hamad 报告说, 与合成材料相比, 用作复合材料加固的木质纤维素材料的密度较低, 允许更轻的复合材料生产并具有更好的热绝缘性。尽管没有注意到加固材料类型对颗粒细长指数的影响, 但 PET 颗粒的长度和直径值最高, 这可能会影响它们在水泥基质中的分布, 从而影响物理、机械和热性能。松木、咖啡壳和稻壳颗粒之间在宽度方面没有差异。然而, 从统计学上看, 松木颗粒与 PET 颗粒的长度相似。根据 Sotannde 等人 and Mendes 等人, 更细长的颗粒可能有利于水泥基板材的静态弯曲性能。

松木颗粒具有最高的全纤维素、纤维素、半纤维素和木质素值, 总萃取物和灰分值最低。一个亮点是稻壳, 因为它的低纤维素值和高灰分含量, 这与它的成分中的大量二氧化硅有关。同时, 咖啡壳呈现出高萃含

量。根据 Fan 等人 and Sellami 等人, 木质纤维素材料中存在的提取物可能会影响水泥的水化时间, 影响木质纤维素颗粒-水泥基质的相互作用, 在它们之间产生空隙, 从而影响复合材料的机械阻力。Mendes 等人发现松树木材的平均值为 10.8% 的提取物、29.6% 的木质素、0.3% 的灰分和 59.3% 的全纤维素。Narciso 等人, 在评估松树 ocarpa 的化学成分时, 得到 43% 的提取物, 28.62% 的木质素, 51.86% 的纤维素, 23.61% 的半纤维素和 0.26% 的灰分。

Oliveira 等人评估了咖啡壳(*Coffea arabica*) 的化学成分, 得到 26.5% 的纤维素、25.5% 的半纤维素、33.5% 的木质素、6.7% 的提取物和 0.2% 的灰分。Setter 等人评估同一类型的材料时, 发现 20.53% 的提取物、27.14% 的木质素和 47.29% 的全纤维素。Chabannes 等人评估了稻壳的化学成分, 发现 25% 的纤维素、18% 的半纤维素、26% 的木质素、2% 的萃取物和 15% 的灰分。Chabi 等人评估了稻壳, 得到 17.2% 的纤维素、24.8% 的半纤维素、35.8% 的木质素、0.01% 的提取物和 22.3% 的灰分。Chabi 等人在评估稻壳的化学成分平均含量时, 发现 16% 的纤维素、4% 的半纤维素、14% 的木质素、2% 的萃取物和 9% 的灰分。总的来说, 本研究的结果与文献中观察到的不同木质纤维素材料的化学成分相吻合。

### 板材物理性能

根据在固化 28 天和加速老化后, 用不同的加固材料类型分析得到的水泥基板材的平均体积密度值, 加固材料类型对板材的密度有明显的影响。老化前面板的体积密度的振幅从 0.98 到 1.22g.cm<sup>-3</sup> 不等, 而加速老化后相同处理的数值从 1.03 到 1.24g.cm<sup>-3</sup>。加速老化后面板的密度增加是由于水泥基质水化的连续性, 这在暴露于水的过程中发生, 也是由于老化周期中的自然碳化。不太稳定的胶凝相再沉淀和无水颗粒离子溶解增强了材料的附着力, 减少了孔隙率, 降低了渗透性, 以及铝硅酸钙水合物的发展, 这也会导致复合材料的致密化。与其他处理相比, 用松木和 PET 颗粒生产的板材在固化 28 天后获得了最高的平均体积密度值。在加速老化后, PET 颗粒生产的板材的平均值最高, 各处理之间有统计学差异。我们还注意到, 用咖啡壳和稻壳生产的板材获得的数值最低, 咖啡壳板材的效果最为突出。使用咖啡壳和稻壳的面板的最低值是由于加固材料的物理和化学特性造成的。对于这两种情况, 这种结果与较低的加固材料密度有关, 导致在预定的质量比下, 加固材料体积较大, 这影响了颗粒分布和与水泥基质的相互作用, 产生更多的孔隙, 从而降低了复合材料的密度。在添加了咖啡壳的

水泥基板材的密度上,出现了加固材料密度与其化学成分之间的相加效应,导致其密度值低于使用稻壳的板材。这是由于与其他加固材料相比,从咖啡壳中获得的提取物价值较高,这影响了水泥的水化,减少了基体与加固材料的相互作用,形成了更多的空隙。木质纤维素材料中存在的提取物干扰了水泥的水化时间,影响了木质纤维素颗粒/水泥基体的相互作用,在它们之间形成了空隙,因此,影响了复合材料的机械阻力。

#### 面板的机械性能

根据用不同类型的加固材料生产的水泥基板材的平均内部结合力 (IB) 值,用松木和PET生产的板材获得了最高的平均内部粘合值,在固化28天和加速老化后呈现出统计学上的平等。这些处理方法在统计学上与使用咖啡壳和稻壳生产的板材不同,后者在统计学上是平等的,但内部粘合强度值降低。使用松木和PET的面板的最高内部粘合值与最高的水泥基面板密度有关,这使得颗粒之间有更好的紧密性,更好的加固材料涂层,因此有足够的复合包装和加固材料-基体的相互作用。另一方面,使用稻壳和咖啡壳的面板的内部粘合值最低,这与材料的物理和化学特性有关,这导致了较低密度的面板。由于水泥固化的干扰,以及水泥基质中较高的孔隙率和较低的钢筋包装,因此,导致钢筋与基质的相互作用较低,因此,内部粘合值较低。加速老化导致水泥基板材的内部粘合值明显下降。尽管面板在湿润和干燥周期中呈现出水泥固化的连续性,但在老化试验中,孔隙急剧减少,复合密度增加,可能老化过程导致加固-基体粘附损失,由于老化周期在水泥基体中产生微裂缝,降低了强度值。

#### 面板的热性能

根据用不同类型的加固材料生产的水泥基板材获得的平均热导率值,在固化28天和加速老化后,加固材料的类型对热导率都有明显的影响。在固化28天时,使用咖啡壳和稻壳的板材的平均热导率值最低,在统计学上是相等的,与其他处理不同。在加速老化后,所有的处理都有统计学上的差异,咖啡壳面板的平均热导率值最低。由于面板和加固材料的密度较低,以及这些材料的物理和化学特性对水泥水化的干扰,在基体中产生孔隙并改善复合材料的热绝缘性,使用农业废弃物的面板呈现出最低的热导率值。PET生产的板材在固化28天时和加速老化后都呈现出最高的热导率值,这是因为板材的密度更高,而且材料的热导率比木质纤维素材料更高。作者还观察到,加速老化增加了所有处理的热导率值,这是因为暴露在水中时发生的水泥基质水化和老化周期

中的自然碳化降低了复合材料的孔隙率导致热导率增加。

#### 结论

补强材料的物理化学特性对水泥基板材的物理、机械和热性能有直接影响。PET瓶废料显示了其在水泥基板材生产中的巨大潜力,即使在加速老化后也能满足有关物理和机械性能的所有贸易标准。尽管用PET生产的水泥板显示出比用工业规模的松木生产的水泥板更好的效果,但它们的导热值最高;因此,适当的施工技术被认为可以提高它们的热绝缘能力。用咖啡壳和稻壳废料加固的水泥板获得的物理机械性能低于用PET和松木生产的水泥板,不符合贸易标准的要求。

#### 参考文献:

- [1]Aygörmez Y, Canpolat O, Al-mashhadani MM, Uysal M (2020) Elevated temperature, freezing-thawing and wetting-drying effects on polypropylene fiber reinforced metakaolin based geopolymer composites. *Constr Build Mater* 235:117502.
- [2]Beg MDH, Pickering KL (2006) Fiber pretreatment and its effects on wood fiber reinforced polypropylene composites. *Mater Manuf Process* 21:303 - 307.
- [3]Frigione M (2010) Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete. *Waste Manag* 30:1101 - 1106. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.01.030>
- [4]Goto M (2009) Chemical recycling of plastics using sub- and supercritical fluids. *J Supercrit Fluids* 47:500 - 507.
- [5]Graça CH, Caldas RMF (2017) Estimation of the amount of residues (bark and pulp) produced during the process of coffee processing in the city of Varginha - MG. *Rev Geonorte* 8:104 - 117
- [6]Hernández-Olivares F, Elizabeth Medina-Alvarado R, BurneoValdivieso XE, Rodrigo Zúñiga-Suárez A (2020) Short sugarcane bagasse fibers cementitious composites for building construction. *Constr Build Mater* 247:118451.
- [7]Kuder KG, Shah SP (2010) Processing of high-performance fiber-reinforced cement-based composites. *Constr Build Mater* 24:181 - 186.
- [8]Li M, Khelifa M, Khennane A, El Ganaoui M (2019) Structural response of cement-bonded wood composite panels as permanent formwork. *Compos Struct* 209:13 - 22. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.10.079>
- [9]Lima AJM, Iwakiri S, Satyanarayana KG, Lomeli-Ramirez MG (2020) Preparation and characterization of wood-cement particleboards produced using metakaolin, calcined ceramics and residues of Pinus spp. *J Build Eng* 32:101722.