

# Green Concrete for Sustainable 3DCP

## Developing sustainable mixture design

by Wilson Ricardo Leal da Silva and Martin Kaasgaard

The number of large-scale projects featuring the use of extrusion-based three-dimensional concrete printing (3DCP) as a construction technology had a steep increase in 2020 and 2021. The most remarkable examples have included apartment and residential buildings in Canada, Germany, Malawi, and the Netherlands.<sup>1-4</sup> Regardless of which 3DCP company (or partnership) is involved in these projects, a few common characteristics can be identified among them:

- Extrusion-based 3DCP is the most widespread technology when it comes to digital fabrication in a large scale (specifically, in the housing market);
- 3DCP is mainly used to print the contour (hollow walls/shells) of the building, followed by complementary processes such as casting and inclusion of reinforcement; and
- Dry mortars (with aggregates up to 4 mm [0.16 in.]) remain the main feedstock used in the process.

While the combination of these characteristics is claimed to deliver a robust, cost effective, and sustainable solution compared to conventional construction, the topic of “sustainability” in 3DCP is still open for debate, and to date, only a handful of studies provide full-depth insights on the sustainability aspects of 3DCP.<sup>5-9</sup> Most of these publications point to the fact that the impact of the digital fabrication process is rather negligible when put against the impact from materials manufacturing. In other words, it is generally understood that digital fabrication applications that help reduce materials consumption yield an overall lower environmental impact when compared to conventional construction methods, especially in the production of complex elements.

The path to a more sustainable 3DCP in large-scale applications includes several aspects ranging from the design to the construction phase and from materials to machinery. One of these—the main scope of this article—is the scaling up of the solid constituents (Fig. 1), because the material amount

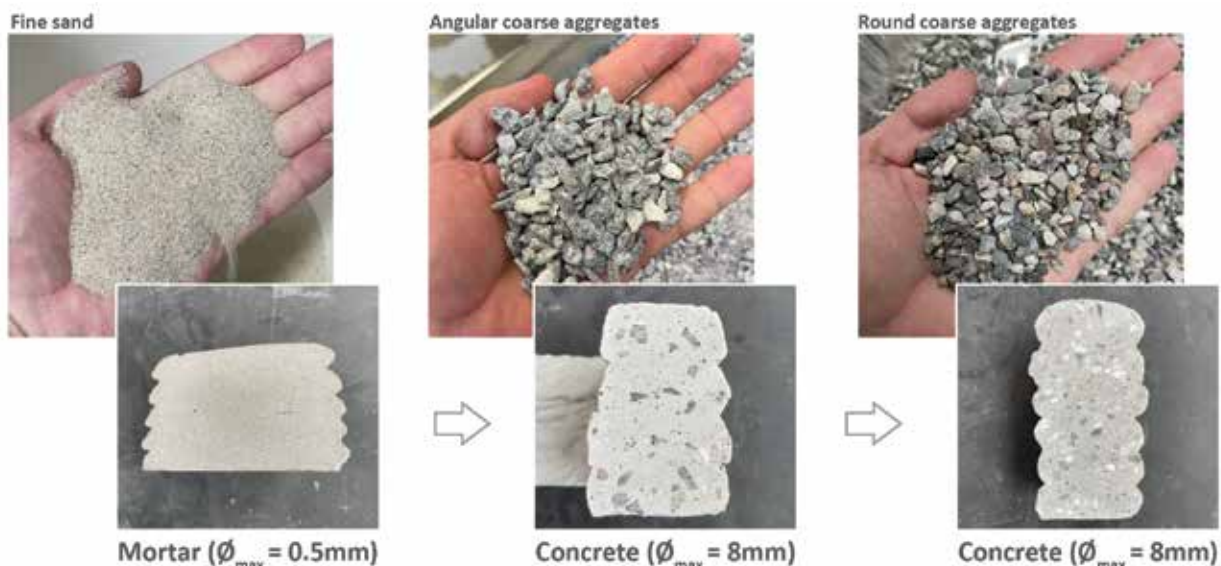


Fig. 1: Upscaling mortar to concrete to enable sustainable large-scale 3DCP using green concrete (Note: 1 mm = 0.04 in.)

and type are critical factors affecting the environmental impact to produce an element such as a wall.<sup>9</sup> Hence, there is a need to further study 3DCP mixtures that incorporate fractions of large aggregates (similar to that of conventional concrete) to achieve a feedstock with lower embodied energy from the beginning, let alone to push for the development of less complex yet more robust 3DCP compositions.

Though 3DCP mortars are becoming leaner, featuring lower cement contents and higher volumes of supplementary cementitious materials (SCMs), and thriving in their specific application (for example, architectural elements, furniture, and urban elements), the scaling up from mortar to concrete is a rational solution not only from a sustainability stance but also from a cost perspective. This is because large aggregates are the cheapest (in cost and CO<sub>2</sub> emissions) components in concrete. Specifically, the CO<sub>2</sub> emissions associated with large aggregates correspond to about 1/100 to 1/150 of that from typical ordinary portland cement (OPC) like CEM I.<sup>10</sup> Further, dry mortars are inherently complex systems that comprise several additives and admixtures that might not be readily available in all markets. Some of the compositions used today contain as many as 15 to 20 components in their final formulation, hence their high price tag when compared to concrete. Lastly, the material used in the printing process needs to be cost competitive with conventional concrete produced locally in a ready mixed concrete (RMC) plant. The latter, combined with aspects such as reinforcement solution, structural design guides, and technical standards, is paramount to enable the widespread use of 3DCP in the construction sector.

An additional aspect to consider is that handling concrete mixtures in a controlled fashion, which is fundamental in 3DCP, imposes greater process challenges.<sup>6,11</sup> As the material scales up, so do all the relevant equipment components used to transport and place concrete through an extrusion nozzle. This means that greater masses must be moved in three dimensions at the construction site, leading to larger power costs to operate the system. Furthermore, larger particles flowing through the pumping system will yield greater equipment wear, leading to increased costs to replace worn parts and to overcome process downtime. The costs related to that are rather hard to grasp at once. One good example of such analysis, especially when it comes to the technical, economic, and environmental potentials in 3DCP, can be found in Reference 1. As this work notes, unlike conventional construction methods, the economic and environmental costs of 3DCP are independent of the shape complexity of the final product.

The presentation of such a comprehensive cost analysis is beyond the scope of this article. Our focus is solely on the environmental costs and benefits of scaling up from mortar to concrete in extrusion-based 3DCP. To this end, the Danish Technological Institute is working on the development of a sustainable 3DCP mixture design approach using blended cements and large aggregates (up to 8 mm [0.30 in.]). Such development is part of the “Next Generation 3D-printed

Concrete Structures” (N3XTCON) project,<sup>11</sup> which is aimed at developing technologies that bring 3DCP to an industrial scale, with a clear focus on sustainability as well as structural and architectural design.

Within a vast range of blended cements available on the market, the N3XTCON team opted to work with a new cement material produced by Cementir Holding, branded as FutureCEM® Cement CEM II/B-M (Q-LL) 52.5 N, which is a limestone calcined-clay cement. This cement is being tested to produce a green, low-CO<sub>2</sub> footprint concrete solution for 3DCP. In this article, we will:

- Review the general aspects of the 3DCP mixture design approach and the mixtures tested thus far;
- Present a comparative analysis against reference mortars and concrete mixtures produced with CEM I; and
- Shed light on the environmental benefits that result from material scaling up from mortar to concrete.

### N3XTCON Mixture Design Approach

The basic premise in our green concrete mixture design strategy is to develop pumpable and extrudable concrete by benchmarking on existing mixture design protocols,<sup>12</sup> as well as using pragmatic concrete testing methods that are easily deployed on site. The proposed N3XTCON mixture design approach focuses on three aspects: sustainability, rheology control, and structural buildup control. The first iteration of the approach is described as follows.

### Sustainability

First and foremost, sustainability is the backbone of our mixture design; in other words, the cement content of an optimal 3DCP mixture must minimize the overall concrete carbon footprint. Some of the parameters considered in the design of a green 3DCP mixture include targets for compressive strength, aggregate grading curve, particle packing density, aggregates’ shape, the volumetric ratio of mortar, binder composition, and concrete slump.

At present, we have limited the maximum aggregate particle size to 8 mm. It is evident that mixture design parameters must be related to extrusion setup. Relevant indicators are:

- The ratio between the maximum particle size and the minimum dimension of the extrusion nozzle ( $\alpha_1 = \varnothing_{max} / b_{nozzle}$ ); and
- The volume fraction of large aggregates ( $\alpha_2 = V_{large\ aggregates} / V_{concrete}$ ), wherein large aggregates are generally considered to be larger than 4 mm and as the particle-size fraction that differentiates a mortar from concrete.

The concrete mixtures tested so far have  $\alpha_1 < 23\%$  and  $\alpha_2 < 26\%$ . Note that  $\alpha_1$  should also be considered as a limiting factor. It can be computed based on the particle-size distribution of locally available aggregates.

We also carried out complementary tests to develop solid recommendations to the industry for parameters such as particle packing density, the volumetric ratio of mortar, and  $\alpha_1$

and  $\alpha_2$ . Note that the results presented in this article correspond to the developments done so far; hence, they should be considered as a “work-in-progress.” Once our development is finalized, the N3XTCON project will come a step closer to delivering a complete green concrete mixture design protocol that can be replicated by those interested in developing sustainable 3DCP mixtures using locally available materials.

Because OPC is associated with high CO<sub>2</sub> emissions,<sup>10</sup> binder composition plays a key role in the overall concrete carbon footprint. Hence, similarly to what is already used in conventional concrete technology, we made use of both blended cements (in our case FutureCEM) and SCMs. The Environmental Product Declaration (EPD) of FutureCEM shows that its CO<sub>2</sub> emission is around 600 kg CO<sub>2</sub>/tonne of cement (1200 lb/ton),<sup>13</sup> which is 30% lower than that from Aalborg Portland RAPID® Cement CEM I 52.5N (LA) and about 45% lower than that from Aalborg White® Cement CEM I 52.5 R SR5.<sup>14,15</sup> These binders are listed as references because they were already tested on different 3DCP tests at the Danish Technological Institute under the N3XTCON project.

So far, the developed procedure is as follows. Once a mixture design is first suggested, we carry out small-scale tests with concrete batches of 7 to 10 L (0.25 to 0.35 ft<sup>3</sup>) to verify the concrete consistency through slump tests. The target slump is between 130 to 220 mm (5.0 to 8.75 in.) to achieve a pumpable and extrudable concrete. The concrete consistency is adjusted primarily by means of water-reducing admixtures (WRAs) and through modifications in the binder composition (that is, the ratio of OPC and SCMs). The volumetric ratio of mortar also serves as a means for adjusting the concrete consistency—if the water-cementitious materials ratio ( $w/cm$ ) and aggregate content are kept constant. Based on the slump test results, the initial yield stress ( $\tau_{y,s}$ ) of the mixture can be computed based on the following equation<sup>16</sup>

$$\tau_{y,s} = \rho (25.5 - S_h) / 17.6$$

where  $\rho$  is the density of the mixture in kg/m<sup>3</sup> and  $S_h$  is the slump in cm. This translates into a target initial yield stress ranging between 0.5 and 1.6 kPa (0.07 to 0.23 psi) for concrete slumps ranging from 130 to 220 mm. Note that the equation for  $\tau_{y,s}$  is only valid for slump values ranging from 50 to 250 mm (2 to 10 in.).

The described methodology serves as a pragmatic approach for designing mixtures for 3DCP and assessing their fresh-state properties before proceeding with large-scale tests. After a base mixture design has been determined and proven to be pumpable and extrudable, two complementary aspects are considered—rheology and structural buildup control, because these are key elements for enabling large-scale 3DCP.<sup>5,17</sup> The control of both rheology and structural buildup is achieved by means of additives and admixtures.

### Rheology control

The rheology control is necessary to ensure that the concrete consistency loss is reduced to a minimum, enabling a long open time (operational time of a fresh mixture) to handle

the concrete before extrusion takes place. This can be achieved by using admixtures such as hydration retarders (for example, sodium gluconate and tartaric acid-based admixtures) and WRAs, mainly polycarboxylate-based high-range water-reducing admixtures (HRWRAs). The dosage of such admixtures will depend on the 3DCP process parameters and production rate, as well as local temperature and humidity.

The most straightforward way to assess whether a particular dosage is fit for the large-scale 3DCP task at hand is to carry out slump tests over time for batches of concrete with different admixture dosages, keeping in mind that the slump should stay within 130 to 220 mm over time ( $\tau_{y,s}$  around 0.5 to 1.6 kPa). To simulate the effect of shearing caused during mixing and pumping, which helps reduce particle flocculation, the material should be remixed right before each slump test is carried out.

### Structural buildup control

After the material is extruded, we must ensure that enough stiffening takes place over time so the printed element will not collapse during printing. To enable that, the structural buildup control strategy relies on adjusting the rate of hydration of different cement components into the concrete matrix. A compelling review of the chemical reactions from different activation strategies used in digital fabrication processes can be found in Reference 18. For the sake of brevity, we will refer to any activation strategy tested in the N3XTCON project (whether in the form of an admixture or an additive) as “accelerators” in this article.

To monitor the concrete structural buildup, we rely on the use of penetration tests—starting with a 20 mm (0.8 in.) diameter hemispherical tip and, if necessary, gradually reducing the tip size as the material stiffens. Such a test enables the quantification of the concrete yield stress at a fresh state at time zero (that is, right after mixing and activation) and over time. The equation that correlates the penetration load to yield stress ( $\tau_{y,p}$ )<sup>19</sup> for tests carried out with a hemispherical tip is

$$\tau_{y,p} = F / 3\pi R^2$$

where  $F$  is the penetration load in N and  $R$  is the radius of the hemispherical tip in mm.

The yield stress of the mixtures we have tested so far is within 1.1 to 2.5 kPa (0.16 to 0.36 psi) at time zero. In our tests, we simulate that the material has been extruded into a plate, where the penetration tests are carried out for a given time interval. We use this  $\tau_{y,p}$  range as an indicator of whether the material is extrudable and stackable before acceleration takes place. Note that when monitoring the evolution of yield strength (structural buildup) over time, the material is not remixed before each testing. This is because the test’s intent is to assess the material stiffening over time after extrusion takes place and the material is at rest. Though this does not correspond to an inline monitoring method, the use of penetration tests is pragmatic, making this a good candidate for on-site testing. Examples of the structural buildup from

3DCP mixtures activated with accelerators of various types are depicted in Fig. 2.

It is evident that the structural buildup is proportional to the dosage of accelerators added to the concrete mixture. From a mixture design perspective, the main point is to first determine the application where a new 3DCP mixture is to be used. The target application, especially the geometrical (contour length and layer overhangs) and process parameters (print speed and concrete extrusion rate), will point toward the vertical buildup rate (the speed at which the material is stacked vertically) and the ideal characteristic time of the process. The latter relates to the time interval (after extrusion) at which the material should be workable before exhibiting a

rapid stiffness rate increase.

For example, when 3DCP is applied to print a house, the vertical buildup rate is in the range of 0.3 to 0.5 m/h (1.0 to 1.6 ft/h) due to the usually large contour length; whereas the production of a concrete element (for example, a column with a relatively short contour length) requires a structural buildup of at least 2.0 to 3.0 m/h (6.6 to 9.8 ft/h), though much faster vertical buildup rates have been reached using mortars. In other words, while the same base concrete mixture (from a rheology control standpoint) can be suitable for both cases, it is the structural buildup control that ensures that the printed element will not collapse and that there is enough open time to secure a proper bonding between printed layers.

Based on the described N3XTCON mixture design approach—focused on sustainability, rheology control, and structural buildup control—we have developed and successfully tested different 3DCP mixture designs, which are discussed in the following section. While we have not yet created a final version of N3XTCON’s mixture design guideline for 3DCP using large aggregates, the results obtained so far are promising from an environmental perspective when compared to premixed mortars and conventional concrete.

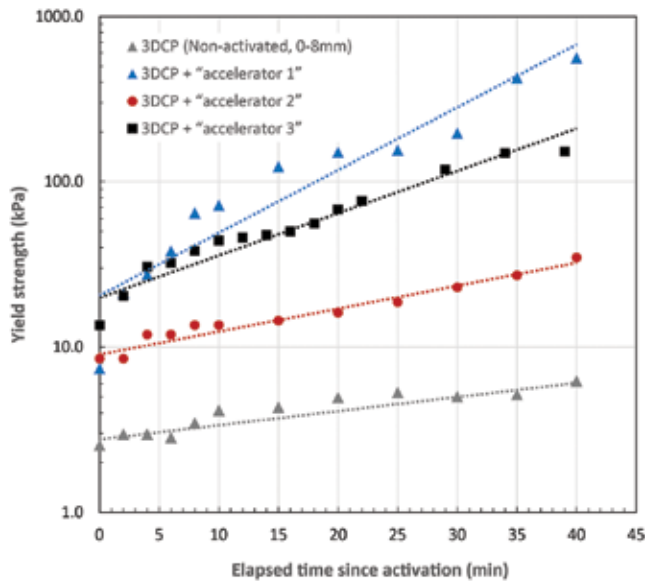


Fig. 2: Structural buildup of various N3XTCON 3DCP mixtures with and without accelerators (aggregates up to 8 mm [0.30 in.]). (Note: 1 kPa = 0.15 psi)

### 3DCP with Mortar and Concrete

The main idea in the environmental analysis is to highlight the benefits of both upscaling from mortars to concrete and making use of blended cement in 3DCP mixtures. The maximum particle size in our tested mortars is 0.5 mm (0.02 in.), while the concrete mixtures also contain aggregates up to 8 mm. In each environmental analysis, the CO<sub>2</sub> emissions of the mixtures are normalized against a reference mixture, which is either a mortar or concrete, produced with one of the cement types listed in Table 1. This table also summarizes the main cement performance parameters and composition requirements according to EN 197-1.<sup>20</sup>

In our study, 3DCP concrete mixtures with strength classes

Table 1:

Main cement performance parameters and composition requirements per EN 197-1<sup>20</sup>

Parameters	Aalborg White CEM I 52.5 R SR5	EN 197-1	RAPID Cement CEM I 52.5 N (MS) (LA)	EN 197-1	FutureCEM CEM II/B-M(Q-LL) 52.5 N	EN 197-1
Clinker content, %	100	95 to 100	96	95 to 100	67	65 to 79
Minor additional constituents' content, %	0	0 to 5	4	0 to 5	—	0 to 5
Calcined clay and limestone contents, %	—	—	—	—	33	21 to 35
$f_{c,2d}$ , MPa	44	≥ 30	36	≥ 20	29	≥ 20
$f_{c,28d}$ , MPa	72	≥ 52.5	67	≥ 52.5	65	≥ 52.5
Initial setting time, min	145	≥ 45	140	≥ 45	160	≥ 45
Density, kg/m <sup>3</sup>	3130	—	3130	—	3000	—

Note: 1 MPa = 145 psi; 1 kg/m<sup>3</sup> = 0.06 lb/ft<sup>3</sup>



**Fig. 3: Close-up view of 3DCP samples produced with mortar and concrete**

of C25 (25 MPa [3600 psi]) and C45 (45 MPa [6500 psi]) produced with FutureCEM and Rapid Cement are compared to Case 1, a 3DCP mortar mixture produced with White Cement; Case 2, a 3DCP mortar mixture produced with FutureCEM; and Case 3, a 3DCP concrete mixture produced with Rapid Cement. In addition, we carried out a complementary analysis comparing 3DCP concrete mixtures to RMC with similar strength classes.

Figure 3 depicts a few sections of two 3DCP tests samples, indicating that we successfully printed the reference mortar and concrete mixtures. Note that the equipment used for pumping and extruding mortars and concrete is not the same. Specifically, for mortar prints, we use a 20 mm diameter nozzle and a progressive cavity pump with a flow rate up to 0.1 m<sup>3</sup>/h (3.5 ft<sup>3</sup>/h) capable of pumping materials with particles size up to 2 mm (0.08 in.); whereas for concrete prints we use a large progressive cavity pump with a flow rate up to 2.4 m<sup>3</sup>/h (85 ft<sup>3</sup>/h) capable of pumping materials with a particle size up to 10 mm (0.4 in.). Both setups are part of the High-Tech Concrete Lab at the Danish Technological Institute, which uses a six-axis industrial robot (Fanuc R-2000iC/165F). Further details on the 3DCP setup can be found in Reference 11.

The OPC content in kg/m<sup>3</sup> and type in each mixture are listed in the caption of Fig. 4. The strength class of R1 and F1 is C25, whereas R2 and F2 is C45. Note that although additives and admixtures have a high CO<sub>2</sub> emission, for example, an HRWRA is about 1.7 kg CO<sub>2</sub><sub>equiv</sub>/kg (lb/lb), which is about twice the emission from most cements,<sup>10</sup> their amount in the total concrete composition is rather low (0.1 to 5% by weight of cement); hence, their individual contributions can be safely neglected. Consequently, our CO<sub>2</sub> analysis does not account for the emissions from WRAs and accelerators used to control rheology and structural buildup.

In Case 1 (Fig. 4(a)), the results indicate that upscaling from mortar to concrete contributes to a CO<sub>2</sub> reduction ranging from 63 to 78%, where the concrete mixtures produced with FutureCEM feature a greater reduction. The

upscaling effect on reducing the overall CO<sub>2</sub> emission of the mixtures is further supported by the replacement of the binder system, that is, from White Cement to FutureCEM, which alone yields about a 30% reduction in CO<sub>2</sub> emissions.

In Case 2 (Fig. 4(b)), the material upscaling features the same trend, with an overall CO<sub>2</sub> reduction ranging from 40 to 65% against the reference mixture. The reduction is less dramatic than the one observed in Case 1 because the reference mortar in Case 2 (Mortar B) is produced with FutureCEM. Note that the strength class of Mortar A and B (C55, 55 MPa [8000 psi]) is greater than that of concrete mixtures R and F. Nonetheless, it is most likely that a 3DCP mortar composition with similar strength class to that of R and F would still feature a greater CO<sub>2</sub> emission given its inherently greater binder content.

Finally, in Case 3 (Fig. 4(c)), the adjustments in the mixture and binder composition enabled a CO<sub>2</sub> reduction to around 16 to 51% against the reference mixture, which is a typical 3DCP concrete composition used as an internal reference for lab trials. If we compare the mixtures with the same strength class, that is, R1 versus F1 (C25) and R2 versus F2 (C45), the reduction in CO<sub>2</sub> emission equals 28.0% and 22.4%, respectively. This showcases the benefit of replacing the standard OPC Rapid Cement (CEM I 52.5N (MS) (LA)) with a blended cement such as FutureCEM (CEM II/B-M(Q-LL) 52.5 N) in 3DCP mixtures.

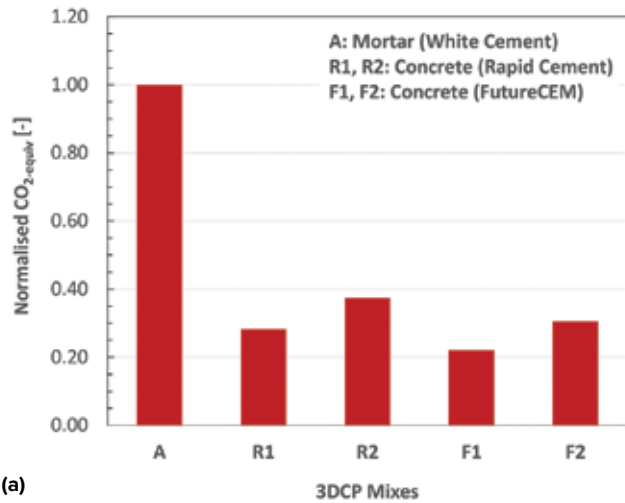
For benchmarking purposes, the estimated carbon footprint of 3DCP mixtures R1, R2, F1, and F2 are plotted in Fig. 5 along with the reported CO<sub>2</sub> emissions of concrete mixtures from a local RMC company.<sup>21</sup>

Figure 5 shows that the emissions from 3DCP mixtures (R and F) are in the same order of magnitude as locally produced concrete for a given strength class. If we consider that the maximum particle size in the 3DCP and RMC-Green mixtures is not the same (8 and 32 mm [0.30 and 1.26 in.]), it is safe to conclude that 3DCP can be made sustainable and competitive from an environmental perspective against conventional concrete if the feedstock used in the printing process comprises large aggregates.

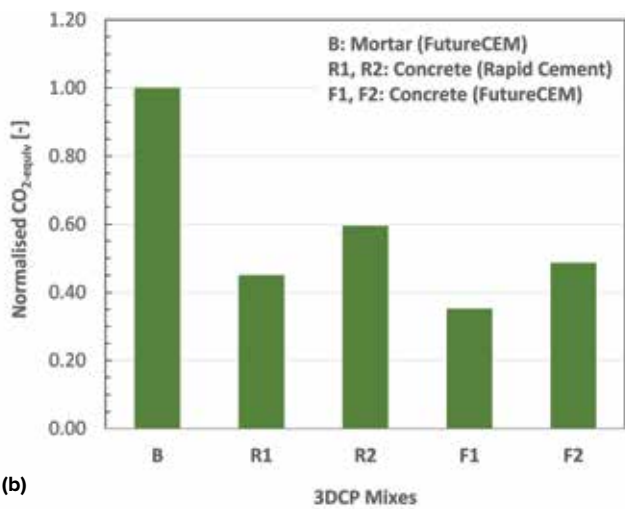
So far, the N3XTCON project developments enabled the production of printable green concrete with as little as 250 kg/m<sup>3</sup> of FutureCEM for strength class C25. The combination of the presented 3DCP mixture design protocol and the use of a newly developed cement (FutureCEM) helped produce what we consider one of the greenest 3DCP compositions with large aggregates for the given strength class. Though we will continue the mixture design protocol developments and testing, the F1 mixture (C25) is a strong candidate for the full-scale demonstration test to be performed in 2022 as a milestone of the N3XTCON project.

## Final Considerations

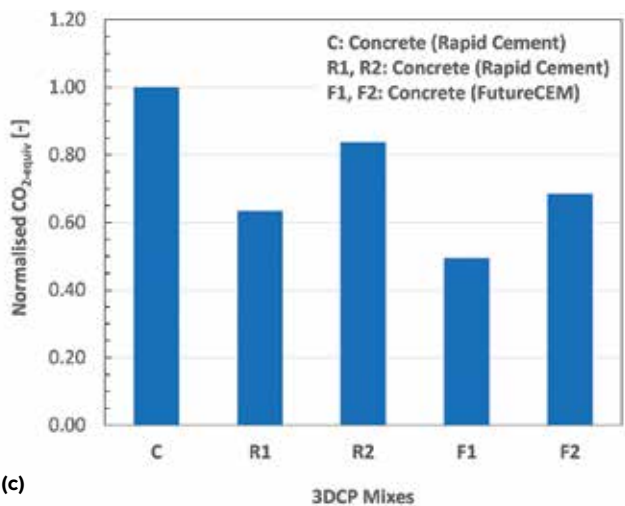
The backbone of our work is built upon years of experience developing both conventional and self-consolidating concrete.



(a)

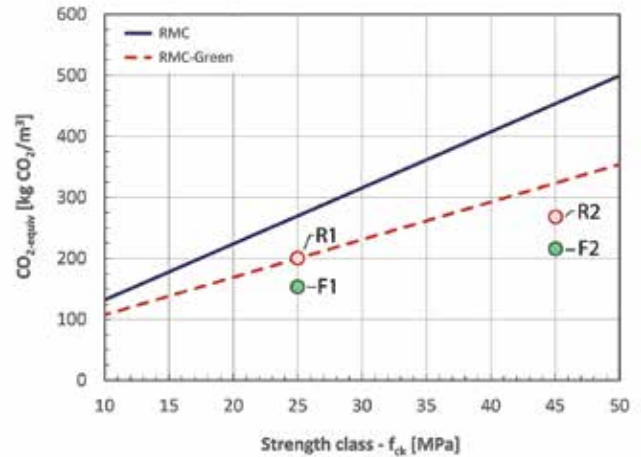


(b)



(c)

**Fig. 4: Normalized CO<sub>2</sub> emission of 3DCP mortars and concrete. The reference value stems from: (a) our typical 3DCP mortar composition (517 kg/m<sup>3</sup> [871 lb/yd<sup>3</sup>] of CEM I 52.5 R SR5); (b) a 3DCP mortar composition produced with FutureCEM (508 kg/m<sup>3</sup> [856 lb/yd<sup>3</sup>] of CEM II/B-M(Q-LL) 52.5 N); and (c) a 3DCP concrete mixture using RAPID Cement (360 kg/m<sup>3</sup> [607 lb/yd<sup>3</sup>] of CEM I 52.5 N (MS) (LA) and 0 to 8 mm aggregates**



**Fig. 5: Comparison of CO<sub>2</sub> emission from 3DCP (concrete mixtures) versus RMC at different strength classes. Note that the RMC values account for conventional concrete mixtures produced with aggregates up to 32 mm (1-1/4 in.) and the slump within 40 to 120 mm (1.50 to 4.75 in.), whereas the RMC-Green is an equivalent mixture that is produced with the same aggregate type and slump range, but not recommended for structural members in exposure classes XS2, XS3, or XA3 (aggressive and extra-aggressive exposure class) according to DS/EN 206 DK NA<sup>22</sup> (Note: 1 kg/m<sup>3</sup> = 0.06 lb/ft<sup>3</sup>; 1 MPa = 145 psi)**

The knowledge we have gained enables the formulation of various 3DCP mixtures using locally available materials, and our goal is to propose a robust, yet pragmatic, N3XTCON mixture design guideline for 3DCP. Though we have not yet landed the final guideline, the obtained results are promising in terms of sustainability and mechanical performance.

To date, our developments have enabled the production of a printable green concrete mixture with a relatively low CO<sub>2</sub> emission when compared to conventional concrete from RMC plants in Denmark. This provides 3DCP companies with a sustainable alternative to premixed materials and gradually paves the way toward a more sustainable 3DCP.

Finally, while the material upscaling from mortar to concrete is a necessary development track to leverage sustainability on large-scale 3DCP applications, the use of mortars should not be neglected, because some minimal feature resolution and design concepts can only be achieved when using fine mortars with a high structural buildup rate. In other words, there is space for both concrete and mortars in the world of 3DCP—it all depends on the application.

### Acknowledgments

The authors would like to acknowledge the support of the Innovation Fund Denmark (Grant No. 8055-00030B: Next Generation of 3D-printed Concrete Structures) and all N3XTCON project partners: Danish Technological Institute, Technical University of Denmark, University of Southern Denmark, Henning Larsen Architects A/S, Bjarke Ingels Group A/S, CRH Concrete A/S, COBOD International A/S, NCC Danmark A/S, Aalborg Portland A/S, FB Gruppen A/S, and AP Pension Livsforsikringsaktieselskab.

## References

1. Everett, H., "PERI Uses COBOD Printer to Build World's First On-Site 3D Printed Apartment Building," 3D Printing Industry, Nov. 2020, <https://3dprintingindustry.com/news/peri-uses-cobod-printer-to-build-worlds-first-on-site-3d-printed-apartment-building-179376>.
2. Sher, D., "First African 3D Printed Buildings Coming Up in Malawi to Support UN's Sustainability Goals," 3D Printing Media Network, Dec. 2020, [www.3dprintingmedia.network/first-african-3d-printed-buildings/](http://www.3dprintingmedia.network/first-african-3d-printed-buildings/).
3. Strömbergsson, A., "World Housing and TAM Develop Canada's First AM Village," 3D Printing Media Network, Feb. 2021, [www.3dprintingmedia.network/world-housing-and-tam-develop-canadas-first-am-village](http://www.3dprintingmedia.network/world-housing-and-tam-develop-canadas-first-am-village).
4. Barandy, K., "Dutch Couple Moves into Europe's First 3D Printed House in Eindhoven," *Designboom*, Apr. 2021, [www.designboom.com/architecture/project-milestone-first-3d-printed-concrete-house-europe-eindhoven-netherlands-completion-04-30-2021](http://www.designboom.com/architecture/project-milestone-first-3d-printed-concrete-house-europe-eindhoven-netherlands-completion-04-30-2021).
5. De Schutter, G.; Lesage, K.; Mechtcherine, V.; Nerella, V.N.; Habert, G.; and Agusti-Juan, I., "Vision of 3D Printing with Concrete—Technical, Economic and Environmental Potentials," *Cement and Concrete Research*, V. 112, Oct. 2018, pp. 25-36.
6. Han, Y.; Yang, Z.; Ding, T.; and Xiao, J., "Environmental and Economic Assessment on 3D Printed Buildings with Recycled Concrete," *Journal of Cleaner Production*, V. 278, Jan. 2021.
7. Ji, G.; Ding, T.; Xiao, J.; Du, S.; Li, J.; and Duan, Z., "A 3D Printed Ready-Mixed Concrete Power Distribution Substation: Materials and Construction Technology," *Materials*, V. 12, No. 9, May 2019, 14 pp.
8. Agusti-Juan, I., and Habert, G., "Environmental Design Guidelines for Digital Fabrication," *Journal of Cleaner Production*, V. 142, Part 4, Jan. 2017, pp. 2780-2791.
9. Agusti-Juan, I.; Müller, F.; Hack, N.; Wangler, T.; and Habert, G., "Potential Benefits of Digital Fabrication for Complex Structures: Environmental Assessment of a Robotically Fabricated Concrete Wall," *Journal of Cleaner Production*, V. 154, June 2017, pp. 330-340.
10. "Embodied Carbon—The ICE Database," Circular Ecology, <https://circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html>. (last accessed Jan. 25, 2022)
11. Leal da Silva, W.R.; Garzón, S.F.; Andersen, T.J.; and Ahrenkilde, I., "Towards Sustainable 3D Concrete Printing," *CPT Construction Printing Technology*, V. 2.20, 2020, pp. 23-31, [https://digitalconcrete2020.com/wp-content/uploads/2020/07/2002\\_CPT\\_DC.a.pdf](https://digitalconcrete2020.com/wp-content/uploads/2020/07/2002_CPT_DC.a.pdf).
12. "Guidelines for Mix Design of SCC" and "Guidelines for Execution of SCC," Danish Technological Institute, Taastrup, Denmark, 2008, [www.dti.dk/guidelines-for-mix-design-of-scc-and-execution-of-scc/description/23767](http://www.dti.dk/guidelines-for-mix-design-of-scc-and-execution-of-scc/description/23767).
13. "Environmental Product Declaration: FutureCEM® Cement CEM II/B-M (Q-LL) 52.5 N," 2020, <https://data.environdec.com/datasetdetail/process.xhtml?uuid=cc38b541-2b99-4309-bdb3-cd2b5f00ce99&version=01.00.001&stock=Environdata>.
14. "Environmental Product Declaration: Aalborg Portland RAPID® Cement CEM I 52.5 N (LA)," The Norwegian EPD Foundation, Oslo, Norway, 2017, 6 pp., [www.aalborgportland.dk/wp-content/uploads/2019/02/epd\\_aalborg\\_portland\\_rapid\\_cement\\_webversion.pdf](http://www.aalborgportland.dk/wp-content/uploads/2019/02/epd_aalborg_portland_rapid_cement_webversion.pdf).
15. "Environmental Product Declaration: Aalborg White® Cement CEM I 52.5 R – SR5 (EA)," EPD International AB, Stockholm, Sweden, 2018, 12 pp., <https://finnsentimenti.fi/wp-content/uploads/S-P-01276-Aalborg-White-Cement.pdf>.
16. Roussel, N., "Correlation Between Yield Stress and Slump: Comparison Between Numerical Simulations and Concrete Rheometers Results," *Materials and Structures*, V. 39, No. 4, Aug. 2006, pp. 501-509.
17. Buswell, R.A.; Leal da Silva, W.R.; Jones, S.Z.; and Dirrenberger, J., "3D Printing Using Concrete Extrusion: A Roadmap for Research," *Cement and Concrete Research*, V. 112, Oct. 2018, pp. 37-49.
18. Marchon, D.; Kawashima, S.; Bessaies-Bey, H.; Mantellato, S.; and Ng, S., "Hydration and Rheology Control of Concrete for Digital Fabrication: Potential Admixtures and Cement Chemistry," *Cement and Concrete Research*, V. 112, Oct. 2018, pp. 96-110.
19. Lootens, D.; Jousset, P.; Martinie, L.; Roussel, N.; and Flatt, R.J., "Yield Stress During Setting of Cement Pastes from Penetration Tests," *Cement and Concrete Research*, V. 39, No. 5, May 2009, pp. 401-408.
20. CEN-EN 197-1:2012, "Cement Part 1: Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements," European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 2011, 56 pp.
21. "Prisliste Færdigbeton (Price List for Ready-Mixed Concrete)," Unicon/Cementir Holding, Copenhagen, Denmark, Jan. 2021, [www.unicon.dk/media/1660/prisliste-2021-web.pdf](http://www.unicon.dk/media/1660/prisliste-2021-web.pdf). (in Danish)
22. DS/EN 206 DK NA:2020, "Concrete – Specification, Performance, Production and Conformity – Rules for Application of EN 206 in Denmark," Danish Standards Foundation, Nordhavn, Denmark, 2020, 76 pp.

Selected for reader interest by the editors.



**Wilson Ricardo Leal da Silva** is a Consultant and Product Manager at the Danish Technological Institute in Denmark. He works in the field of digital solutions applied to concrete technology, where 3DCP has become his passion and main topic of research and development over the past 7 years. He created a database of publications related to 3DCP—The 3DCP Database (<http://3dconcreteprinting.info>)—

which is free to access and has about 300 listed publications. He received his PhD in civil engineering from Czech Technical University, Prague, Czech Republic, in 2013, where he worked on artificial intelligence applications in concrete technology.



**Martin Kaasgaard** is a Senior Consultant and Business Manager at the Danish Technological Institute. He is a chemical engineer with 14 years of experience in the concrete industry. He is a specialist in concrete mixture design and quality control. He participated in several European research and developments projects focused on self-healing concrete, photocatalytic concrete, alkali-activated fly ash cement, and formulation of low-CO<sub>2</sub> binders. He received his MSc from Aalborg University, Aalborg, Denmark.

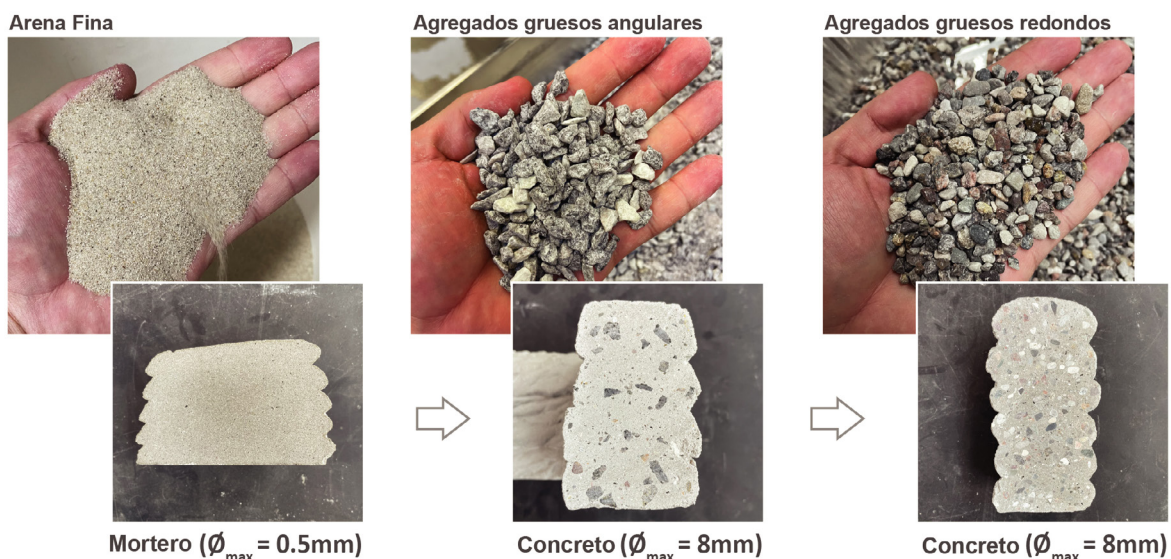
# Concreto ecológico para una 3DCP sostenible

*Desarrollo de un diseño de mezcla sostenible*

*por Wilson Ricardo Leal da Silva y Martin Kaasgaard*

El número de proyectos a gran escala que presentan el uso de la impresión tridimensional de concreto (3DCP, por sus siglas en inglés) basada en la extrusión como tecnología de construcción tuvo un fuerte aumento en 2020 y 2021. Entre los ejemplos más notables se encuentran edificios de apartamentos y residencias en Canadá, Alemania, Malawi y los Países Bajos.<sup>1-4</sup> Independientemente de qué empresa (o asociación) 3DCP participe en estos proyectos, se pueden identificar algunas características comunes entre ellos:

- La tecnología 3DCP basada en la extrusión es la más extendida cuando se trata de la fabricación digital a gran escala (concretamente, en el mercado residencial);
- La tecnología 3DCP se utiliza principalmente para imprimir el contorno (paredes huecas/cubiertas) del edificio, seguido de procesos complementarios como la fundición y la inclusión de refuerzos, y
- Los morteros secos (con agregados de hasta 4 mm [0.16 pulg.]) siguen siendo la principal materia prima utilizada en el proceso.



**Figura.1.** Transformación del mortero en concreto para hacer posible una 3DCP sostenible a gran escala utilizando concreto ecológico (Nota: 1 mm = 0.04 pulg.)



Si bien se afirma que la combinación de estas características ofrece una solución robusta, rentable y sostenible en comparación con la construcción convencional, el tema de la “sostenibilidad” en la 3DCP sigue siendo objeto de debate y, hasta la fecha, sólo un pequeño número de estudios ofrece una perspectiva completa sobre los aspectos de sostenibilidad de la 3DCP<sup>5-9</sup>.

La mayor parte de estas publicaciones destacan que el impacto del proceso de fabricación digital es más bien irrelevante si se compara con el impacto de la fabricación de materiales. En otras palabras, suele entenderse que las aplicaciones de fabricación digital que ayudan a reducir el consumo de materiales generan un menor impacto medioambiental global en comparación con los métodos constructivos convencionales, especialmente en la producción de elementos complejos.

El camino hacia una mayor sostenibilidad de la 3DCP en las aplicaciones a gran escala incluye varios aspectos que van desde el diseño hasta la fase de construcción y desde los materiales hasta la maquinaria. Uno de ellos --el objetivo principal de este artículo-- es la ampliación de los componentes sólidos (Figura 1), ya que la cantidad y el tipo de material son factores clave que inciden en el impacto ambiental al producir un elemento por ejemplo, un muro.<sup>9</sup> Por lo tanto, es necesario seguir estudiando las mezclas de 3DCP que incorporan fracciones de agregados de gran tamaño (similares a las del concreto convencional) para lograr una materia prima con menor energía incorporada desde el principio, y más aún para impulsar el desarrollo de composiciones de 3DCP menos complejas pero más robustas.

Aunque los morteros de 3DCP son cada vez más esbeltos, presentando menores contenidos de cemento y mayores volúmenes de materiales cementantes suplementarios (SCM), y prosperando en su aplicación específica (por ejemplo, elementos arquitectónicos, muebles y elementos urbanos), el paso del mortero al concreto es una solución racional no sólo desde el punto de vista de la sostenibilidad, sino también desde la perspectiva de su costo.

Esto se debe a que los agregados de gran tamaño son los componentes más baratos (en cuanto a costo y a emisiones de CO<sub>2</sub>) del concreto. Específicamente, las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a los agregados de gran tamaño corresponden a alrededor de 1/100 a 1/150 de aquellas del típico cemento portland ordinario (CPO) como el CEM I.<sup>10</sup> Además, los morteros secos son sistemas inherentemente complejos que comprenden varias adiciones y aditivos que pueden no estar disponibles en todos los mercados. Algunas de las composiciones utilizadas hoy en día contienen hasta 15 o 20 ingredientes en su formulación final, de ahí su elevado precio en comparación con el concreto. Por último, el material utilizado en el proceso de impresión tiene que ser rentable en comparación con el concreto convencional producido localmente en una planta de concreto premezclado (RMC, por sus siglas en inglés). Esto último, combinado con aspectos como soluciones para el refuerzo, guías de diseño estructural y normas técnicas, es primordial para permitir el uso generalizado de la 3DCP en el sector de la construcción.

Uno de los aspectos adicionales que hay que tener en cuenta es que la manipulación de las mezclas de concreto de forma controlada, que es fundamental en la 3DCP, impone mayores desafíos al proceso.<sup>6,11</sup> A medida que el material aumenta, también lo hacen todos los componentes del equipo utilizados para transportar y colocar el concreto a través de una boquilla de extrusión. Esto significa que hay que mover mayores masas en tres dimensiones en el sitio de construcción, lo que conlleva un mayor gasto de energía para operar el sistema. Además, las partículas más grandes que fluyen a través del sistema de bombeo provocarán un mayor desgaste de los equipos, lo que supondrá un aumento de los gastos de sustitución de las piezas desgastadas y la superación del tiempo de inactividad del proceso. Resulta bastante difícil comprender de inmediato el costo relacionado con ello. Un buen ejemplo de este tipo de análisis, especialmente cuando se trata de los potenciales técnicos, económicos y ambientales en la 3DCP, se puede encontrar en la Referencia 1. Como señala este trabajo, a diferencia de los

métodos de construcción convencionales, los costos económicos y ambientales de la 3DCP son independientes de la complejidad de la forma del producto final.

La presentación de un análisis de costos tan exhaustivo está fuera del alcance de este artículo. Nos centramos únicamente en los costos y beneficios ambientales del paso del mortero al concreto en la 3DCP basada en la extrusión. Para ello, el Instituto Tecnológico de Dinamarca está trabajando en el desarrollo de un enfoque de diseño de mezclas de 3DCP sostenible utilizando cementos mezclados y agregados de gran tamaño (hasta 8 mm [0,30 pulg.]). Este desarrollo forma parte del proyecto “Estructuras de Concreto de Nueva Generación Impresas en 3D” (N3XTCON, por sus siglas en inglés),<sup>11</sup> cuyo objetivo es desarrollar tecnologías que lleven a la 3DCP a una escala industrial, con un claro enfoque en la sostenibilidad, así como en el diseño estructural y arquitectónico.

Dentro de una amplia gama de cementos mezclados disponibles en el mercado, el equipo de N3XTCON optó por trabajar con un nuevo material de cemento producido por Cementir Holding, etiquetado como FutureCEM® Cemento CEM II/B-M (Q-LL) 52,5 N, que es un cemento de caliza y arcilla calcinada. Este cemento está siendo evaluado para producir una solución de concreto ecológico y de baja huella de CO<sub>2</sub> para la 3DCP. Aquí:

- Revisaremos los aspectos generales del enfoque de diseño de mezcla 3DCP y las mezclas analizadas hasta el momento;
- Presentaremos un análisis comparativo con morteros de referencia y mezclas de concreto producidas con CEM I; y
- Arrojaemos luz sobre los beneficios ambientales que se derivan del paso del material de mortero a concreto.

## Enfoque de diseño de mezcla N3XTCON

La premisa básica de nuestra estrategia de diseño de mezclas de concreto ecológico es desarrollar un concreto bombeable y extruible tomando como referencialos protocolos existentes de diseño de mezclas,<sup>12</sup> así como utilizar métodos pragmáticos de prueba de concreto que sean fáciles de implementar en el sitio. La propuesta

de diseño de la mezcla N3XTCON se centra en tres aspectos: sostenibilidad, control reológico y el control de la acumulación estructural. La primera iteración del enfoque el enfoque se describe a continuación.

## Sostenibilidad

En primer lugar, la sostenibilidad es la columna vertebral de nuestro diseño de mezcla; en otras palabras, el contenido de cemento de una mezcla 3DCP óptima debe minimizar la huella de carbono global del concreto. Algunos de los parámetros considerados en el diseño de una mezcla 3DCP ecológica incluyen los objetivos de resistencia a la compresión, la curva granulométrica de los agregados, la densidad de empaquetamiento de las partículas, la forma de los agregados, la relación volumétrica del mortero, la composición del aglutinante y el revenimiento del concreto.

En la actualidad, hemos limitado el tamaño máximo de las partículas de los agregados a 8 mm. Es evidente que los parámetros de diseño de la mezcla deben estar relacionados con la configuración de la extrusión. Los indicadores relevantes son:

- La relación entre el tamaño máximo de las partículas y la dimensión mínima de la boquilla de extrusión ( $\alpha_1 = \varnothing_{\max} / b_{\text{boquilla}}$ ); y
- La fracción de volumen de los agregados de gran tamaño ( $\alpha_2 = V_{\text{agregados de gran tamaño}} / V_{\text{concreto}}$ ), donde los agregados de gran tamaño se consideran generalmente mayores de 4 mm y como la fracción de tamaño de partícula que distingue a un mortero de un concreto.

Las mezclas de concreto analizadas hasta ahora tienen una  $\alpha_1 < 23\%$  y una  $\alpha_2 < 26\%$ . Hay que tener en cuenta que  $\alpha_1$  también debe considerarse un factor limitante. Puede calcularse basándose en la distribución granulométrica de los agregados disponibles localmente.

También realizamos pruebas complementarias para desarrollar recomendaciones sólidas para la industria en cuanto a parámetros como la densidad de empaquetamiento de las partículas,

la relación volumétrica del mortero y  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$ . Hay que tener en cuenta que los resultados presentados en este artículo corresponden a los desarrollos realizados hasta el momento, por lo que deben considerarse como un “trabajo en curso”. Una vez que nuestro desarrollo haya finalizado, el proyecto N3XTCON estará un paso más cerca de ofrecer un protocolo completo de diseño de mezclas de concreto ecológico que pueda ser replicado por aquellos interesados en desarrollar mezclas 3DCP sostenibles utilizando materiales disponibles localmente.

Dado que el CPO se asocia con altas emisiones de  $\text{CO}_2$ <sup>10</sup>, la composición del aglutinante juega un papel clave en la huella de carbono global del concreto. Por lo tanto, de forma similar a lo que ya se utiliza en la tecnología del concreto convencional, hicimos uso tanto de cementos mezclados (en nuestro caso FutureCEM) como de SCM. La Declaración Ambiental de Producto (EPD, por sus siglas en inglés) de FutureCEM muestra que su emisión de  $\text{CO}_2$  es de alrededor de 600 kg de  $\text{CO}_2$ /tonelada de cemento (1200 lb/tonelada),<sup>13</sup> que es un 30% menor que la del cemento Aalborg Portland RAPID® CEM I 52.5N (LA) y alrededor de un 45% menor que la del cemento Aalborg White® CEM I 52.5 R SR5.<sup>14,15</sup> Estos aglutinantes figuran como referencias porque ya fueron probados en diferentes ensayos 3DCP en el Instituto Tecnológico Danés en el marco del proyecto N3XTCON.

Hasta ahora, el procedimiento desarrollado es el siguiente. Una vez que se propone un diseño de mezcla, se realizan pruebas a pequeña escala con lotes de concreto de 7 a 10 L (0.25 a 0.35 pies<sup>3</sup>) para verificar la consistencia del concreto mediante pruebas de revenimiento. El revenimiento objetivo se sitúa entre 130 y 220 mm (5.0 a 8.75 pulg.) para conseguir un concreto bombeable y extruible. La consistencia del concreto se ajusta principalmente por medio de aditivos reductores de agua (WRA, por sus siglas en inglés) y a través de modificaciones en la composición del aglutinante (es decir, la proporción del CPO y de los SCM). La relación volumétrica del mortero también sirve para ajustar la consistencia del concreto, si la relación agua-materiales cementantes ( $a/mc$ ) y el contenido de agregados se mantienen constantes. A partir de

los resultados de la prueba de revenimiento, el límite de fluencia inicial ( $t_{y's}$ ) de la mezcla puede calcularse en base a la siguiente ecuación<sup>16</sup>

$$t_{y's} = \rho (25.5 - S_h) / 17.6$$

donde  $\rho$  es la densidad de la mezcla en  $\text{kg/m}^3$  y  $S_h$  es el revenimiento en cm. Esto se traduce en un límite de fluencia inicial objetivo que oscila entre 0.5 y 1.6 kPa (0.07 a 0.23 psi) para revenimientos de concreto que van de 130 a 220 mm. Obsérvese que la ecuación de  $t_{y's}$  sólo es válida para valores de revenimiento comprendidos entre 50 y 250 mm (2 a 10 pulg.).

La metodología descrita sirve como enfoque pragmático para el diseño de mezclas para la 3DCP y la evaluación de sus propiedades en estado fresco antes de proceder con las pruebas a gran escala. Una vez que se ha determinado el diseño de la mezcla base y se ha demostrado que es bombeable y extruible, se consideran dos aspectos complementarios: la reología y el control de la acumulación estructural, ya que son elementos clave para permitir la 3DCP a gran escala.<sup>5,17</sup> El control tanto de la reología como de la acumulación estructural se consigue mediante adiciones y aditivos.

## Control reológico

El control reológico es necesario para garantizar que la pérdida de consistencia del concreto se reduzca al mínimo, permitiendo un tiempo abierto prolongado (tiempo de operación de una mezcla fresca) para manejar el concreto antes de que se produzca la extrusión. Esto puede lograrse mediante el uso de aditivos tales como retardantes de la hidratación (por ejemplo, gluconato de sodio y aditivos a base de ácido tartárico) y WRAs (aditivos reductores de agua, por sus siglas en inglés), principalmente aditivos reductores de agua de alto rango a base de policarboxilatos (HRWRAs, aditivos super reductores de agua, por sus siglas en inglés). La dosificación de estos aditivos dependerá de los parámetros del proceso de 3DCP y de la tasa de producción, así como de la temperatura y la humedad de la zona.

La forma más sencilla de evaluar si una determinada dosificación es adecuada para la tarea de 3DCP a gran escala es realizar pruebas de revenimiento con el paso del tiempo para lotes de concreto con diferentes dosificaciones de aditivos, teniendo en cuenta que el revenimiento debe mantenerse entre 130 y 220 mm a lo largo del tiempo ( $t_{y's}$  alrededor de 0.5 a 1.6 kPa). Para simular el efecto del esfuerzo cortante causado durante el mezclado y el bombeo, que ayuda a reducir la floculación de las partículas, el material debe volver a mezclarse justo antes de realizar cada prueba de revenimiento.

## Control de la acumulación estructural

Tras la extrusión del material, debemos asegurarnos de que con el tiempo se produzca una rigidez suficiente para que el elemento impreso no se colapse durante la impresión. Para ello, la estrategia de control de la acumulación estructural se basa en el ajuste de la velocidad de hidratación de los distintos componentes del cemento en la matriz del concreto. En la Referencia 18 se puede encontrar una revisión convincente de las reacciones químicas de diferentes estrategias de activación utilizadas en los procesos de fabricación digital. Para ser breves, en este artículo nos referiremos a cualquier estrategia de activación probada en el proyecto N3XTCON (ya sea en forma de aditivo o de adición) como "acelerantes".

Para controlar la acumulación estructural del concreto, nos valemos del uso de pruebas de penetración, comenzando con una punta semiesférica de 20 mm de diámetro (0.8 pulg.) y, si es necesario, reduciendo gradualmente el tamaño de la punta a medida que el material se hace más rígido. Este ensayo permite cuantificar el límite de fluencia del concreto en estado fresco en el tiempo cero (es decir, justo después de la mezcla y la activación) y a lo largo del tiempo. La ecuación que correlaciona la carga de penetración con el límite de fluencia ( $t_{y's}$ )<sup>19</sup> para los ensayos realizados con una punta semiesférica es:

$$t_{y's} = F / 3\pi R^2$$

donde  $F$  es la carga de penetración en N y  $R$  es el radio de la punta semiesférica en mm.

El límite de fluencia de las mezclas que hemos probado hasta ahora está entre 1,1 y 2,5 kPa (0,16 a 0,36 psi) en el tiempo cero. En nuestras pruebas, simulamos que el material ha sido extruido en una placa, donde las pruebas de penetración se llevan a cabo durante un intervalo de tiempo determinado. Utilizamos este rango  $\tau_{y,p}$  como indicador de si el material es extruible y apilable antes de que se produzca la aceleración. Obsérvese que cuando se controla la evolución de la resistencia a la fluencia (acumulación estructural) con el paso del tiempo, el material no se vuelve a mezclar antes de cada prueba. Esto se debe a que la intención del ensayo es evaluar la rigidez del material con el paso del tiempo después de que se produzca la extrusión y el material esté en reposo. Aunque esto no corresponde a un método de supervisión en línea, el uso de pruebas de penetración es pragmático, lo que lo convierte en un buen candidato para las pruebas in situ. En la Figura 2 se muestran ejemplos de la acumulación estructural de mezclas de 3DCP activadas con aceleradores de diversos tipos.

Es evidente que la acumulación estructural es proporcional a la dosis de acelerantes añadida a la mezcla de concreto. Desde el punto de vista del diseño de la mezcla, lo más importante es determinar primero la aplicación en la que se va a utilizar una nueva mezcla de 3DCP. La aplicación prevista, especialmente los parámetros geométricos (longitud del contorno y rebordes de las capas) y de proceso (velocidad de impresión y tasa de extrusión del concreto), señalarán la tasa de acumulación vertical (la velocidad a la que el material se apila verticalmente) y el tiempo específico ideal del proceso. Este último se refiere al intervalo de tiempo (después de la extrusión) en el que el material debe ser trabajable antes de mostrar un rápido aumento de la tasa de rigidez.

Por ejemplo, cuando se aplica la 3DCP para imprimir una casa, la tasa de acumulación vertical está en el rango de 0.3 a 0.5 m/h (1.0 a 1.6 pies/h) debido a la longitud de contorno que suele ser grande; mientras que la producción de un elemento de concreto (por ejemplo, una columna con una longitud de contorno relativamente corta) requiere una acumulación

estructural de al menos 2.0 a 3.0 m/h (6.6 a 9.8 pies/h), aunque se han alcanzado tasas de acumulación vertical mucho más rápidas utilizando morteros. En otras palabras, aunque la misma mezcla de concreto base (desde el punto de vista del control de la reología) puede ser adecuada para ambos casos, es el control de la acumulación estructural el que garantiza que el elemento impreso no se colapse y que haya suficiente tiempo abierto para asegurar una unión adecuada entre las capas impresas.

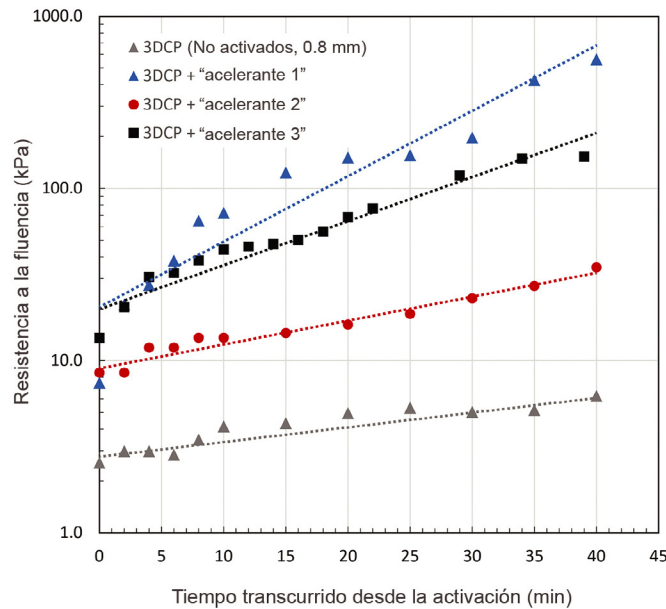


Figura.2. Acumulación estructural de varias mezclas N3XTCON 3DCP con y sin acelerantes (agregados de hasta 8 mm [0.30 in.]). (Nota: 1 kPa = 0,15 psi)

Basándonos en el enfoque de diseño de la mezcla N3XTCON descrito, centrado en la sostenibilidad, el control reológico y el control de la acumulación estructural, hemos desarrollado y probado con éxito diferentes diseños de mezcla de 3DCP, que se discuten en la siguiente sección. Aunque todavía no hemos creado una versión final de la guía de diseño de mezclas de N3XTCON para el uso de 3DCP con agregados de gran tamaño, los resultados obtenidos hasta ahora son prometedores desde el punto de vista ambiental en comparación con los morteros premezclados y el concreto convencional.

Parámetros	Aalborg White CEM I 52.5 R SR5	EN 197-1	RAPID Cement CEM I 52.5 N (MS) (LA)	EN 197-1	FutureCEM CEMII/B-M (Q-LL) 52.5 N	EN 197-1
Contenido de clinker, %	100	95 a 100	96	95 a 100	67	65 a 79
Contenido mínimo adicional de los ingredientes, %	0	0 a 5	4	0 a 5	--	0 al 5
Contenido de arcilla calcinada y caliza, %	--	--	--	--	33	21 a 35
fc, 2d, MPa	44	≥ 30	36	≥20	29	≥20
fc, 28d, MPa	72	≥ 52.5	67	≥52.5	65	≥52.5
Fraguado inicial, min	145	≥ 45	140	≥45	160	≥45
Densidad, kg/m3	3130	--	3130	--	3000	--

Nota: 1 MPa = 145 psi; 1 kg/m3 = 0.06 lb/pie3

### 3DCP con mortero y concreto

La idea principal del análisis ambiental es destacar los beneficios tanto de la ampliación de los morteros al concreto como de la utilización de cemento mezclado en las mezclas de 3DCP. El tamaño máximo de partícula en nuestros morteros ensayados es de 0.5 (0.02 pulg.), mientras que las mezclas de concreto también contienen agregados de hasta 8 mm. En cada análisis ambiental, las emisiones de CO<sub>2</sub> de las mezclas se normalizan con respecto a una mezcla de referencia, consistente en un mortero o un concreto, producido con uno de los tipos de cemento mencionados en la Tabla 1. Esta tabla también resume los principales parámetros de rendimiento del cemento y los requisitos de composición según la norma EN 197-1.<sup>20</sup>

En nuestro estudio, las mezclas de concreto 3DCP con resistencias del tipo C25 (25 MPa [3600 psi]) y C45 (45 MPa [6500 psi]) producidas con FutureCEM y RAPID Cement son comparadas con el Caso 1, una mezcla de mortero 3DCP producida con White Cement; con el Caso 2, una mezcla de mortero 3DCP producida con FutureCEM; y con el Caso 3, una mezcla de concreto 3DCP producida con RAPID Cement. Además, llevamos a cabo un análisis complementario en el que se comparan las mezclas de concreto 3DCP con RMC con tipos de resistencia similares.

La Figura 3 muestra algunas secciones de dos muestras de prueba 3DCP, lo que indica que imprimimos con éxito las mezclas de referencia de mortero y de concreto. Obsérvese que el equipo utilizado para el bombeo y la extrusión de morteros y concretos no es el mismo. Específicamente, para las impresiones de mortero, utilizamos una boquilla de 20 mm de diámetro y una bomba de cavidad progresiva con un caudal de hasta 0.1 m<sup>3</sup>/h (3.5 pies<sup>3</sup>/h) capaz de bombear materiales con un tamaño de partículas de hasta 2 mm (0.08 pulg.); mientras que para las impresiones de concreto utilizamos una bomba de cavidad progresiva grande con un caudal de hasta 2.4 m<sup>3</sup>/h (85 pies<sup>3</sup>/h) capaz de bombear materiales con un tamaño de partículas de hasta 10 mm (0.4 pulg.). Ambos sistemas forman parte del Laboratorio de Concreto de

Alta Tecnología del Instituto Tecnológico de Dinamarca, que utiliza un robot industrial de seis ejes (Fanuc R-2000iC/165F). Para más detalles sobre la configuración de la 3DCP, véase la Referencia 11.



Figura.3. Detalle de las muestras de 3DCP producidas con mortero y con concreto

El contenido de CPO en kg/m<sup>x</sup> y el tipo en cada mezcla se indican en la descripción de la Figura 4. El tipo de resistencia de R1 y F1 es C25, mientras que el de R2 y F2 es C45. Hay que tener en cuenta que, aunque las adiciones y los aditivos presentan una elevada emisión de CO<sub>2</sub>, por ejemplo, un HRWRA es de unos 1.7 kg de CO<sub>2</sub><sub>equiv</sub>/kg (lb/lb), lo que supone aproximadamente el doble de la emisión de la mayoría de los cementos, su cantidad en la composición total del concreto es bastante baja (del 0.1 al 5% en peso del cemento); por lo tanto, sus contribuciones individuales pueden desestimarse sin problemas. Por lo tanto, nuestro análisis de CO<sub>2</sub> no tiene en cuenta las emisiones de los WRA y los acelerantes utilizados para controlar la reología y la acumulación estructural.

En el caso 1 (Figura 4(a)), los resultados indican que el paso del mortero al concreto contribuye a una reducción de CO<sub>2</sub> que oscila entre el 63 y el 78%, donde las mezclas de concreto producidas con FutureCEM presentan una mayor reducción. El efecto de aumento en la reducción de las emisiones globales de CO<sub>2</sub> de las mezclas se ve reforzado por la sustitución

del sistema aglutinante, es decir, del White Cement al FutureCEM, que por sí solo produce una reducción de aproximadamente el 30% de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

En el Caso 2 (Figura 4(b)), el aumento de material presenta la misma tendencia, con una reducción global de CO<sub>2</sub> que oscila entre el 40 y el 65% respecto a la mezcla de referencia. La reducción es menos dramática que la observada en el Caso 1 porque el mortero de referencia en el Caso 2 (Mortero B) se produce con FutureCEM. Nótese que la resistencia tipo de los morteros A y B (C55, 55 MPa [8000 psi]) es mayor que la de las mezclas de concreto R y F. No obstante, lo más probable es que una composición de mortero 3DCP con una resistencia tipo similar a la de R y F siga presentando una mayor emisión de CO<sub>2</sub>, dado su mayor contenido inherente de aglutinante.

Por último, en el caso 3 (Figura 4(c)), los ajustes en la composición de la mezcla y del aglutinante permitieron una reducción del CO<sub>2</sub> de entre el 16 y el 51% con respecto a la mezcla de referencia, que es una composición típica de concreto 3DCP utilizada como referencia interna para los ensayos de laboratorio. Si comparamos las mezclas con la misma resistencia tipo, es decir, R1 frente a F1 (C25) y R2 frente a F2 (C45), la reducción de la emisión de CO<sub>2</sub> es del 28.0% y del 22.4%, respectivamente. Esto demuestra el beneficio de sustituir el CPO estándar Rapid Cement (CEM I 52,5N (MS) (LA)) por un cemento mezclado como el FutureCEM (CEM II/B-M(Q-LL) 52,5 N) en las mezclas de 3DCP.

A efectos de comparación, la huella de carbono estimada de las mezclas de 3DCP R1, R2, F1 y F2 se representa en la Figura 5 junto con las emisiones de CO<sub>2</sub> de las mezclas de concreto comunicadas por una empresa local de concreto premezclado (RMC).<sup>21</sup>

La figura 5 muestra que las emisiones de las mezclas de 3DCP (R y F) están en el mismo orden de magnitud que el concreto producido localmente para una resistencia tipo determinada. Si tenemos en cuenta que el tamaño máximo de las partículas en las mezclas de 3DCP y RMC-Ecológico no es el mismo (8 y 32 mm [0.30 y

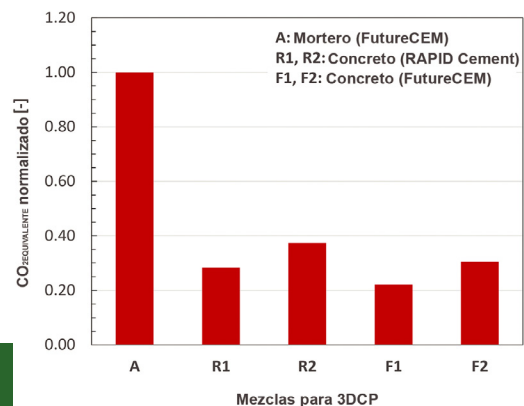
1.26 pulg.]), se puede concluir que la 3DCP puede hacerse sostenible y competitiva desde una perspectiva ambiental frente al concreto convencional si la materia prima utilizada en el proceso de impresión comprende agregados de gran tamaño.

Hasta ahora, los desarrollos del proyecto N3XTCON han permitido la producción de concreto ecológico imprimible con tan sólo 250 kg/m<sup>3</sup> de FutureCEM para la resistencia tipo C25. La combinación del protocolo de diseño de la mezcla de 3DCP presentado y el uso de un cemento recientemente desarrollado (FutureCEM) ayudó a producir lo que consideramos una de las composiciones de 3DCP más ecológicas con agregados de gran tamaño para la resistencia tipo dada. Aunque continuaremos con los desarrollos y pruebas del protocolo de diseño de mezcla, la mezcla F1 (C25) es una fuerte candidata para la prueba de demostración a escala real que se realizará en 2022 como hito del proyecto N3XTCON.

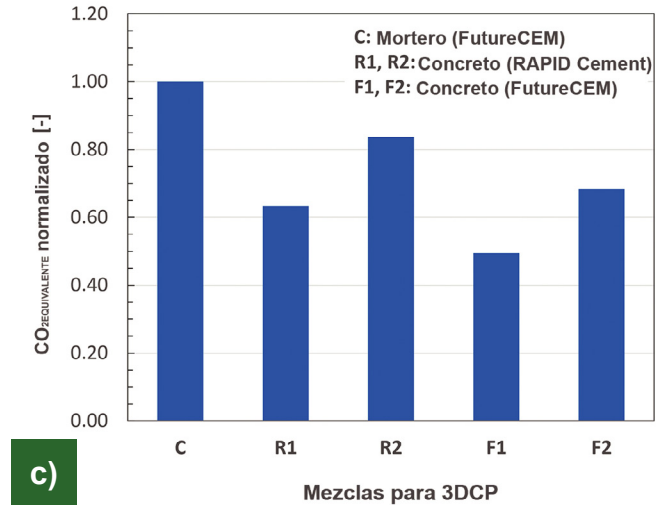
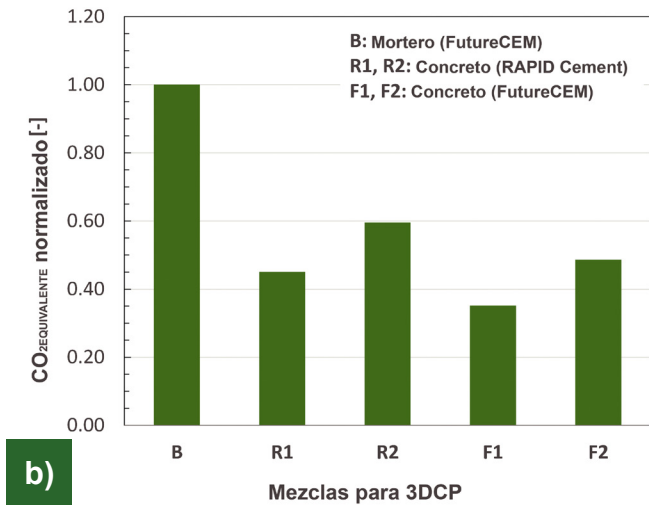
## Consideraciones finales

La columna vertebral de nuestro trabajo se construyó a través de los años de experiencia desarrollando concretos convencionales, así como concretos autoconsolidables.

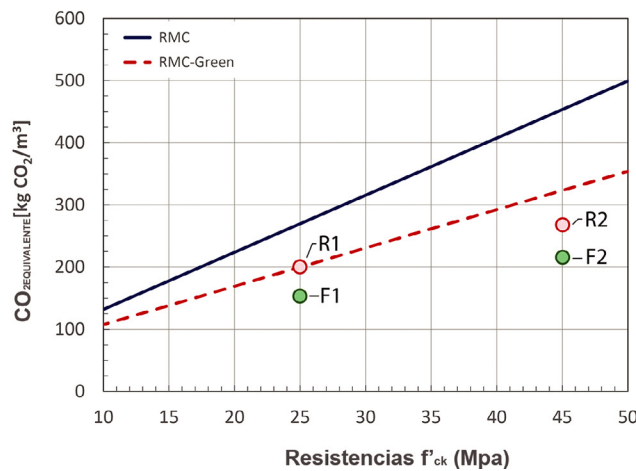
El conocimiento que hoy hemos adquirido nos permite la formulación de varias mezclas 3DCP utilizando los materiales localmente disponibles, y es nuestro objetivo proponer una guía práctica N3XTCON de diseño de mezclas 3DCP. A pesar de que aún no hemos obtenido la deseada guía final, los resultados que hemos obtenido son prometedores en términos de sostenibilidad y comportamiento mecánico.



a)



**Figura.4. Emisión normalizada de CO<sub>2</sub> de morteros y concretos para 3DCP. Los valores de referencia son: (a) La composición típica de nuestros morteros 3DCP (517 kg/m<sup>3</sup> (871 lb/yd<sup>3</sup>)) de CEM I 52.5 R SR5; (b) composición del mortero 3DCP producido con FutureCEM (508 kg/m<sup>3</sup> (856 lb/yd<sup>3</sup>)) de CEM II/B-M(Q-LL) 52.5 N; y (c) Mezcla de concreto 3DCP usando RAPID Cement (360 kg/m<sup>3</sup> (607lbs/yd<sup>3</sup>)) de CEM I 52.5 N (MS)(LA) y agregados de 0 a 8 mm**



**Figura.5. Comparación de emisiones de CO<sub>2</sub> de mezclas de concreto 3DCP contra Concretos premezclados convencionales de distintas resistencias. Nótese que los valores del concreto premezclado convencional corresponden a agregados de hasta 32 mm (1-1/4") y el revenimiento dentro de los 40 a 120 mm (1.5 a 4.75 pulg.), mientras que en el concreto ecológico es una mezcla equivalente producida con el mismo tipo de agregados y rango de revenimiento, pero que no se recomienda para elementos estructurales en situaciones de exposición XS2, XS3 o XA3 (Clases agresivas y extra-agresivas de exposición) de acuerdo con la norma DS/EN 206 DK NA22 (Nota: 1 kg/m<sup>3</sup>=0.06 lb/ft<sup>3</sup>; 1 Mpa = 145 psi)**

Hasta ahora nuestro desarrollo ha permitido la producción de una mezcla de concreto ecológica susceptible de ser usada en la impresión 3D con relativamente bajo contenido de emisiones de CO<sub>2</sub> cuando se le compara con concretos convencionales de plantas de concreto premezclado en Dinamarca. Lo anterior permite ofrecer a las compañías involucradas en la 3DCP una mezcla alternativa y sustentable de materiales premezclados, y gradualmente pavimenta el camino hacia un concreto 3DCP más sustentable. Finalmente, mientras vamos cambiando el material de mortero a concreto en un camino necesario para apoyar la sustentabilidad en aplicaciones de 3DCP de gran escala, el uso de mortero no debe despreciarse, porque algunos conceptos mínimos de resolución y diseño solamente se pueden alcanzar con el uso de morteros finos con un alto índice de acumulación estructural. En otras palabras, en el mundo del 3DCP hay espacio para ambos, concreto y mortero, todo dependerá de la aplicación de que se trate.

## Agradecimientos

Los autores desean agradecer el apoyo del Fondo Danés de Innovación (GRant No 8055-00030B: Siguiete Generación de Estructuras de Concreto Impresas en 3D) y a todos los socios



del proyecto N3XTCON: Instituto Tecnológico Danés, Universidad Técnica de Dinamarca, Universidad del sur de Dinamarca, Henning Larsen Arquitectos A/S, NCC Damarca A/S, Aalborg Portland A/S, FB Gruppen A/S, y AP Pension Livsforsikringsaktieselskab.

## Referencias

1. Everett, H., "PERI Uses COBOD Printer to Build World's First On-Site 3D Printed Apartment Building," 3D Printing Industry, Nov. 2020, <https://3dprintingindustry.com/news/peri-uses-cobod-printer-to-build-worlds-first-on-site-3d-printed-apartment-building-179376>.
2. Sher, D., "First African 3D Printed Buildings Coming Up in Malawi to Support UN's Sustainability Goals," 3D Printing Media Network, Dec. 2020, [www.3dprintingmedia.network/first-african-3d-printed-buildings/](http://www.3dprintingmedia.network/first-african-3d-printed-buildings/).
3. Strömbergsson, A., "World Housing and TAM Develop Canada's First AM Village," 3D Printing Media Network, Feb. 2021, [www.3dprintingmedia.network/world-housing-and-tam-develop-canadas-first-am-village](http://www.3dprintingmedia.network/world-housing-and-tam-develop-canadas-first-am-village).
4. Barandy, K., "Dutch Couple Moves into Europe's First 3D Printed House in Eindhoven," Designboom, Apr. 2021, [www.designboom.com/architecture/project-milestone-first-3d-printed-concrete-house-europe-eindhoven-netherlands-completion-04-30-2021](http://www.designboom.com/architecture/project-milestone-first-3d-printed-concrete-house-europe-eindhoven-netherlands-completion-04-30-2021).
5. De Schutter, G.; Lesage, K.; Mechtcherine, V.; Nerella, V.N.; Habert, G.; and Agustí-Juan, I., "Vision of 3D Printing with Concrete—Technical, Economic and Environmental Potentials," *Cement and Concrete Research*, V. 112, Oct. 2018, pp. 25-36.
6. Han, Y.; Yang, Z.; Ding, T.; and Xiao, J., "Environmental and Economic Assessment on 3D Printed Buildings with Recycled Concrete," *Journal of Cleaner Production*, V. 278, Jan. 2021.
7. Ji, G.; Ding, T.; Xiao, J.; Du, S.; Li, J.; and Duan, Z., "A 3D Printed Ready-Mixed Concrete Power Distribution Substation: Materials and Construction Technology," *Materials*, V. 12, No. 9, May 2019, 14 pp.
8. Agustí-Juan, I., and Habert, G., "Environmental Design Guidelines for Digital Fabrication," *Journal of Cleaner Production*, V. 142, Part 4, Jan. 2017, pp. 2780-2791.
9. Agustí-Juan, I.; Müller, F.; Hack, N.; Wangler, T.; and Habert, G., "Potential Benefits of Digital Fabrication for Complex Structures: Environmental Assessment of a Robotically Fabricated Concrete Wall," *Journal of Cleaner Production*, V. 154, June 2017, pp. 330-340.
10. "Embodied Carbon—The ICE Database," *Circular Ecology*, <https://circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html>. (last accessed Jan. 25, 2022)
11. Leal da Silva, W.R.; Garzón, S.F.; Andersen, T.J.; and Ahrenkilde, I., "Towards Sustainable 3D Concrete Printing," *CPT Construction Printing Technology*, V. 2.20, 2020, pp. 23-31, [https://digitalconcrete2020.com/wp-content/uploads/2020/07/2002\\_CPT\\_DC.pdf](https://digitalconcrete2020.com/wp-content/uploads/2020/07/2002_CPT_DC.pdf).
12. "Guidelines for Mix Design of SCC" and "Guidelines for Execution of SCC," Danish Technological Institute, Taastrup, Denmark, 2008, [www.dti.dk/guidelines-for-mix-design-of-scc-and-execution-of-scc/description/23767](http://www.dti.dk/guidelines-for-mix-design-of-scc-and-execution-of-scc/description/23767).
13. "Environmental Product Declaration: FutureCEM® Cement CEM II/B-M (Q-LL) 52.5 N," 2020, <https://data.environdec.com/datasetdetail/process.xhtml?uuid=cc38b541-2b99-4309-bdb3-cd2b5f00ee99&version=01.00.001&stock=Environdata>.
14. "Environmental Product Declaration: Aalborg Portland RAPID® Cement CEM I 52.5 N (LA)," The Norwegian EPD Foundation, Oslo, Norway, 2017, 6 pp., [www.aalborgportland.dk/wp-content/uploads/2019/02/epd\\_aalborg\\_portland\\_rapid\\_cement\\_webversion.pdf](http://www.aalborgportland.dk/wp-content/uploads/2019/02/epd_aalborg_portland_rapid_cement_webversion.pdf).
15. "Environmental Product Declaration: Aalborg White® Cement CEM I 52.5 R – SR5 (EA)," EPD International AB, Stockholm, Sweden, 2018, 12 pp., <https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/S-P-01276-Aalborg-White-Cement.pdf>.
16. Roussel, N., "Correlation Between Yield Stress and Slump: Comparison Between Numerical Simulations and Concrete Rheometers Results," *Materials and Structures*, V. 39, No. 4, Aug. 2006, pp. 501-509.
17. Buswell, R.A.; Leal da Silva, W.R.; Jones, S.Z.; and Dirrenberger, J., "3D Printing Using Concrete Extrusion: A Roadmap for Research," *Cement and Concrete Research*, V. 112, Oct. 2018, pp. 37-49.
18. Marchon, D.; Kawashima, S.; Bessaies-Bey, H.; Mantellato, S.; and Ng, S., "Hydration and Rheology Control of Concrete for Digital Fabrication: Potential Admixtures and Cement Chemistry," *Cement and Concrete Research*, V. 112, Oct. 2018, pp. 96-110.
19. Lootens, D.; Jousset, P.; Martinie, L.; Roussel, N.; and Flatt, R.J., "Yield Stress During Setting of Cement Pastes from Penetration Tests," *Cement and Concrete Research*, V. 39, No. 5, May 2009, pp. 401-408.
20. CEN-EN 197-1:2012, "Cement Part 1: Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements," European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 2011, 56 pp.
21. "Prisliste Færdigbeton (Price List for Ready-Mixed Concrete)," Unicon/Cementir Holding, Copenhagen, Denmark, Jan. 2021, [www.unicon.dk/media/1660/prisliste-2021-web.pdf](http://www.unicon.dk/media/1660/prisliste-2021-web.pdf). (in Danish)
22. DS/EN 206 DK NA:2020, "Concrete – Specification, Performance, Production and Conformity – Rules for Application of EN 206 in Denmark," Danish Standards Foundation, Nordhavn, Denmark, 2020, 76 pp.



**Wilson Ricardo Leal da Silva**, es consultor y gerente de proyectos del Instituto Tecnológico Danés en Dinamarca. Trabaja en el campo de las soluciones digitales aplicadas a la tecnología del concreto, donde el 3DCP se ha convertido en su pasión y principal tema de investigación y desarrollo por los pasados 7 años. Ha creado una base de datos de publicaciones relacionadas con el 3DCP – The 3DCP Database (<http://3dconcreteprinting.info>)-- que es de acceso libre y en que se encuentran más de 300 publicaciones enlistadas. Recibió su doctorado de la Universidad Técnica Checa, en Praga, República Checa en 2013 donde trabajo en aplicaciones de inteligencia artificial en tecnología de concreto



**Martin Kaasgaard**, es consultor senior y gerente de proyectos del Instituto Tecnológico Danés en Dinamarca. Es ingeniero químico con 14 años de experiencia en la industria del concreto. Es un especialista en el diseño de mezclas de concreto, así como en control de calidad del mismo. Ha participado en varios proyectos de investigación y desarrollo europeos enfocados en el concreto autoreparable, concreto fotocatalítico, cementos con cenizas volantes activadas y la formulación de cementantes de bajo contenido de CO2. Recibió su MSc de la Universidad de Aalborg, en Aalborg

La traducción de este artículo correspondió al Capítulo de México Noreste

*Título: Concreto ecológico para una 3DCP sostenible*



*Traductora:*  
*Lic. Iliana M. Garza Gutiérrez*



*Traductor y Revisor Técnico:*  
*Ing. José Lozano y Ruy Sánchez*