

Field Demonstrations Using Cellulose Nanomaterials as Concrete Additives

by Krishna Siva Teja Chopperla, Sivakumar Ramanathan, Robert J. Moon, O. Burkan Isgor, and W. Jason Weiss

Cellulose nanomaterials (CNMs) are primarily derived from forest biomass. CNMs are nontoxic and biodegradable,¹ and they can be produced from excess biomass that would otherwise fuel forest fires. Lab studies have shown that the use of CNMs in cement paste mixtures can have the potential to increase the extent of clinker reaction, improve flexural strength, and reduce ion transport.²⁻¹³ This article describes three field trials designed to examine the potential for full-scale applications of CNMs in concrete.

What are CNMs?

Cellulose in the form of fibers has long been used in concrete, and they are effective in reducing plastic shrinkage and shrinkage cracking.^{14,15} Cellulose fibers also have been used in commercial cement-board siding products.¹⁶ Research in the last decade has looked at cellulose materials on a much smaller scale (the nanoscale). CNMs are cellulose-based nano-sized particles with properties and functionalities distinct from these traditional cellulose materials.¹⁷

CNMs have a broad spectrum of shapes, sizes, and chemistries that arise from three general factors: 1) the cellulose source; 2) the extraction/production method; and 3) the surface chemistry. CNMs have been produced from a wide variety of cellulose sources, including plants, trees, recycled paper products, carrot pulp, and coconut husks.¹⁸⁻²⁰ The production of CNMs is a multistep process tailored for the specific cellulose source. Generally, the production consists of pre-treatment to purify and homogenize the source material, followed by refinement into nano-sized particles. Two primary refinement approaches are used: mechanical shear and acid hydrolysis. The former process tears the source material apart and creates nano-sized particles with fibril-like morphologies (microns in length, nanometers in width, and often branched).¹⁹ These particles are called cellulose nanofibrils (CNFs). The latter process dissolves the disordered regions of the source material, creating nano-sized particles with spindle-like morphologies (nanometers in length and

width, with tapered ends).¹⁸ These particles are called cellulose nanocrystals (CNCs). The surface chemistry and other features of CNFs and CNCs can result as artifacts of the CNM production method or subsequent chemical modification.²¹

CNCs produced from wood typically have lengths of 50 to 350 nm, widths of 5 to 20 nm, and aspect ratios of 5 to 30. To put this into perspective, this is similar to the scale of nanosilica, precipitated silica, and silica fume, but about 100 times smaller than the portland cement particle size of 1 to 50 μm .^{4,5,22} Figure 1 shows a transmission electron microscope (TEM) image of CNC produced at a pilot plant located at the Forest Products Laboratory (FPL) of the U.S. Forest Service.

CNMs—The Forest Service Perspective

CNM has a unique level of importance for the U.S. Forest Service in terms of improved use of forestry resources and

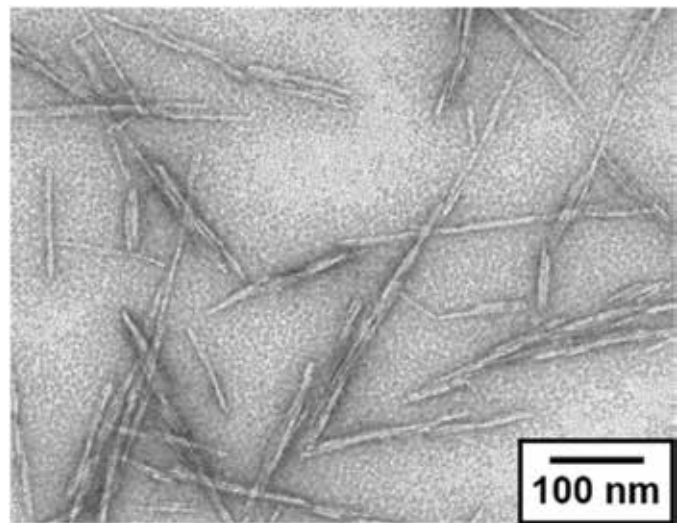


Fig. 1: TEM image of wood CNC produced from the CNC pilot plant located at U.S. Forest Service, Forest Products Laboratory. Reprinted from Reference 17 with permission from Springer

forest land management. Forest land management includes the removal of excess forest biomass such as underbrush, branches, and small-diameter trees; it is therefore an effective approach to lower the risk of catastrophic wildfires by minimizing “fuel loading.” With recent data showing annual totals of over 50,000 wildfires in the United States,²³ removal of excess biomass is clearly a high priority.

Mechanical thinning costs around \$1000 per acre (0.4 ha), and the United States has millions of acres of forest land that need forest biomass restoration.²⁴ As CNMs can be produced from low-value biomass, CNM production offers an opportunity to offset the cost of removing excess forest biomass.

Overall benefits of CNMs production include: 1) lowering the probability of catastrophic wildfires; 2) curbing the greenhouse gas (GHG) emissions from the decay of dead biomass; and 3) providing a value-added product in other industries like construction.

CNMs as an additive for cementitious materials

The addition of CNMs to cementitious materials has been shown to alter rheology, setting times, degree of hydration, and mechanical properties.^{4,5} Low dosages (<0.3% by binder volume) of CNCs reduce the paste yield stress and improve concrete workability. In contrast, higher dosages of CNCs (> 0.3% by binder volume) increase the paste yield stress and reduce the workability, as CNCs tend to agglomerate.^{2,25} The addition of CNCs delays the setting time of concrete by about 2 to 3 hours due to the adsorption of the CNCs on the cement grains²; however, the CNCs also accelerate the reaction rate after setting starts. Past work has hypothesized that the preferential adsorption of CNCs on the cement grains results in the formation of pathways for water molecules to ingress through the calcium silicate hydrate (C-S-H) layer around the cement grains (called short circuit diffusion) and increases the degree of hydration of the system, resulting in more efficient use of the cementitious binder.^{4,5,26,27} This increased cement

hydration can be especially prevalent at later ages.²⁸ CNC additions to some cementitious systems have been shown to improve mechanical properties such as flexural strength (by up to 20 to 30%) and transport properties by improving the cement degree of hydration and reducing pore connectivity.^{4,5,12,26,27}

While ASTM C595, “Standard Specification for Blended Hydraulic Cements,” allows cement that contains up to 15% limestone (Type IL or portland-limestone cement [PLC]),^{29,30} the increased clinker reaction offered by CNC additions provides opportunities to reduce the clinker content further. A recent study showed that CNCs addition enabled higher amounts of limestone (up to 22% total) in blends of ordinary portland cement (OPC) and limestone without compromising on mechanical and transport properties.¹² While promising, additional research is needed to evaluate CNC effects in mixtures with supplementary cementitious materials and a comprehensive range of clinkers.

Field Demonstrations of Use of CNCs in Concrete

Three projects were selected to demonstrate that CNC could be used in full-scale concrete placement. The first demonstration was for a parking lot pavement in Greenville, SC, USA, in 2018. The second was for a precast concrete bridge constructed in Yreka, CA, USA, in 2020. The third was for slabs-on-ground constructed in Corvallis, OR, USA, in 2022. The FPL pilot plant prepared the CNCs used in the projects, and the CNC was used in a slurry form that had not been dried.

Parking lot, Greenville, SC

This project demonstrated the successful implementation of CNC in a large-scale concrete structure with no issues regarding workability, finishing, and setting. The parking lot was constructed using a 60 yd³ (46 m³) volume of concrete containing CNC (dosed at 0.2% the CNC solid volume by volume of cement) and a 12 yd³ (9 m³) volume of conventional concrete (as a reference). Both concrete types were batched using similar processes; however, for CNC-concrete, CNC suspension was manually added to the concrete truck after batching the other ingredients (the mixing water was reduced to compensate for the water in the suspension). The mixture proportions are listed in Table 1. Both mixtures comprised similar amounts of all other materials, including air-entraining admixture (AEA) and high-range water-reducing admixture (HRWRA). Figure 2 shows the placement of the CNC mixture.

Both mixtures had 28-day compressive strengths that exceeded the design strength of 4000 psi (28 MPa). The reference concrete had a 28-day compressive strength of 5281 ± 26 psi (36 ± 0.2 MPa), while the CNC-concrete had a 28-day compressive strength of 4718 ± 76 psi (33 ± 0.5 MPa). The between-truck coefficient of variation for the two measured compressive strengths was 6%, which is within the acceptable between-truck variation discussed in ACI

Table 1:
Mixture proportions of concrete for the Greenville, SC, parking lot

Material	Plain mixture	Mixture with 0.2% CNC
w/b	0.41	0.41
Type I/II cement, lb/yd ³	525	525
Fly ash, lb/yd ³	150	150
Natural sand, lb/yd ³	332	332
Manufactured sand, lb/yd ³	776	776
Coarse aggregate, lb/yd ³	1800	1800
CNC solids, lb/yd ³	0	0.74
Water, lb/yd ³	275	275
Air, %	3.0 to 6.0	3.0 to 6.0

Note: w/b is water-binder ratio; 1 lb/yd³ = 0.6 kg/m³



Fig. 2: The 0.2% CNC mixture being placed for the parking lot



Fig. 3: The 0.1% CNC mixture being placed and vibrated in the prestressed box girder formwork

Table 2:
Mixture proportions of concrete for box girders
(as mixed)

Material	Plain mixture	Mixture with 0.1% CNC
w/b	0.36	0.36
Type III cement, lb/yd ³	712	718
3/4 to 1/2 in. aggregate, lb/yd ³	592	602
1/2 in. to No. 4 aggregate, lb/yd ³	1148	1135
Sand, lb/yd ³	1212	1217
Water, lb/yd ³	250	250
CNC suspension, lb/yd ³	0	3.6

Note: w/b is water-binder ratio; 1 lb/yd³ = 0.6 kg/m³; 1 in. = 25 mm

214R-11.³¹ The 56-day splitting tensile strengths of the plain concrete and CNC-concrete were 427 ± 36 psi (2.9 ± 0.2 MPa) and 385 ± 58 psi (2.7 ± 0.4 MPa), respectively, and they were statistically similar. This work illustrated that CNCs could be used in full-scale field concrete batching and field placement.

Bridge girders, Yreka, CA

The second demonstration project was the construction of a prestressed box girder bridge as a replacement for an existing bridge spanning Moffett Creek in Yreka, CA. The girders were cast at the Knife River Prestress plant in Harrisburg, OR. Each girder was 28 ft-11.5 in. long, 3 ft-5.25 in. wide, and 12 in. high (8827 x 1048 x 305 mm), and each weighed 18,000 lb (8165 kg). The design compressive strength was 6000 psi (41 MPa) with a release strength of 4900 psi (34 MPa). Two mixtures were used: a CNC-concrete (dosed at 0.1% CNC solid volume by volume of cement) and a reference mixture. AEA, workability-retaining admixture, and HRWRA were used in similar amounts for both mixtures. The mixture proportions are shown in Table 2. Figure 3 shows the casting of the girders with the CNC-concrete.



Fig. 4: Placement of the box girders

The measured slump was 7 in. and 6 in. (180 mm and 150 mm) for the reference and CNC-concrete mixture, respectively. The measured air content of the reference and CNC-concrete mixture was 4.0% and 5.8%, respectively. The 28-day compressive strength of the reference mixture was 8900 ± 286 psi (61 ± 2 MPa), while the CNC-concrete mixture had a strength of 9480 ± 488 psi (65 ± 3 MPa); both mixtures exceeded the design strength of 6000 psi (41 MPa). The 28-day compressive strengths of both mixtures were statistically similar. The 28-day splitting tensile strength of the CNC-concrete mixture (1321 ± 80 psi [9 ± 0.6 MPa]) was similar to that of the reference mixture (1273 ± 46 psi [9 ± 0.3 MPa]). This similar strength of the CNC-concrete mixture, despite the higher air content in the CNC-concrete mixture (which could be expected to reduce the strength), is attributed to an increase in the degree of hydration of the cement. The box girders met all specifications and were transported to the project site, where they were installed by the local county's staff (Fig. 4). This project successfully demonstrated that CNC could be added to concrete mixtures and result in similar or potentially improved performance.

Slabs-on-ground, Corvallis, OR

The third demonstration consisted of slabs-on-ground placed at the Linus Pauling Middle School in Corvallis, OR, for use as an outdoor classroom. Three slabs and one walkway were placed using four mixtures. The mixtures are described in Table 3 and include a reference mixture (OPC-CNC0.0), a mixture with CNC dosed at 0.2% CNC solid volume by volume of cement (OPC-CNC0.2), a mixture with ground limestone replacing 20% cement (LS20-CNC0.0), and a mixture with ground limestone replacing 20% of the cement and with CNC dosed at 0.2% CNC solid volume by volume of cement (LS20-CNC0.2). The slabs were 41 ft wide, 14 ft long, and 5 in. thick (12.5 m x 4.3 m x 127 mm). The walkway was approximately 16 ft long, 3 ft wide, and 5 in. thick (5 m x 1 m x 127 mm). The 28-day design strength was 3500 psi (24 MPa), the target slump was 4 to 6 in. (102 to 152 mm), and the target air content was $5 \pm 1.5\%$. Table 3 lists the mixture proportions. Figure 5 shows the site after placing all the slabs.

All of the mixtures achieved the desired slump and the desired air content. The 28-day compressive strengths were 5250 ± 546 psi (36 ± 4 MPa) for OPC-CNC0.0, 5173 ± 470 psi (36 ± 3 MPa) for OPC-CNC0.2, 4113 ± 154 psi (28 ± 1 MPa) for LS20-CNC0.0, and 3840 ± 251 psi (26 ± 2 MPa) for LS20-CNC0.2. The strength difference between the CNC and non-CNC mixture was 1.5% for the OPC mixtures and 7% for

Table 3:
Mixture proportions of the mixtures placed in Corvallis, OR

Material	OPC-CNC0.0	OPC-CNC0.2	LS20-CNC0.0	LS20-CNC0.2
w/b	0.588	0.534	0.543	0.508
OPC, lb/yd ³	525	521	423	420
Limestone, lb/yd ³	0	0	113	113
Coarse aggregate (3/4 in.), lb/yd ³	1697	1695	1692	1710
Sand, lb/yd ³	1346	1326	1334	1333
Water, lb/yd ³	308	278	291	271
CNC suspension, lb/yd ³	0	4.87	0	5.03

Note: w/b is water-binder ratio; 1 lb/yd³ = 0.6 kg/m³; 1 in. = 25 mm



Fig. 5: The site after placing the slabs and the walkway

the LS20 mixtures, and the strengths were statistically similar for the mixtures with and without CNCs. The LS20 mixtures had about 20% lower GHG emissions compared to the OPC mixtures due to higher limestone and lower clinker content in the LS20 mixtures. This part of the project successfully demonstrated the use of CNCs in low-carbon mixtures made by replacing OPC with limestone in full-scale field applications. Work is underway to study the long-term durability of the mixtures with CNCs in conventional and low-carbon concrete mixtures.

Conclusions

The field trials described in this article showed that concrete mixtures with CNCs can be produced, transported, and placed similarly to conventional concrete mixtures. The mixtures with CNCs showed similar performance to conventional mixtures in terms of workability and strength. Further work is underway to monitor the long-term durability performance of field concrete mixtures with CNCs.

Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge the financial support from the U.S. Endowment for Forestry and Communities.

References

1. Moon, R.J.; Martini, A.; Nairn, J.; Simonsen, J.; and Youngblood, J., "Cellulose Nanomaterials Review: Structure, Properties and Nanocomposites," *Chemical Society Reviews*, V. 40, No. 7, July 2011, pp. 3941-3994.
2. Cao, Y., "Nano-Modification for High-Performance Cement Composites with Cellulose NanoCrystals and Carbon Nanotubes," PhD dissertation, Purdue University, West Lafayette, IN, 2014, 209 pp.
3. Sun, X.; Wu, Q.; Lee, S.; Qing, Y.; and Wu, Y., "Cellulose Nanofibers as a Modifier for Rheology, Curing and Mechanical Performance of Oil Well Cement," *Scientific Reports*, V. 6, No. 1, Aug. 2016, pp. 1-9.
4. Fu, T.; Moon, R.J.; Zavattieri, P.; Youngblood, J.; and Weiss, W.J., "Cellulose Nanomaterials as Additives for Cementitious Materials," *Cellulose-Reinforced Nanofibre Composites: Production, Properties and Applications*, M. Jawaid, S. Boufi, and A. Khalil, eds., Woodhead Publishing, Sawston, UK, 2017, pp. 455-482.
5. Fu, T.; Montes, F.; Suraneni, P.; Youngblood, J.; and Weiss, W.J., "The Influence of Cellulose Nanocrystals on the Hydration and Flexural Strength of Portland Cement Pastes," *Polymers*, V. 9, No. 9, Sept. 2017, 16 pp.
6. Haddad Kolour, H.; Ahmed, M.; Alyaseen, E.; and Landis, E.N., "An Investigation on the Effects of Cellulose Nanofibrils on the Performance of Cement Paste and Concrete," *Advances in Civil Engineering Materials*, V. 7, No. 1, Sept. 2018, 15 pp.
7. Dousti, M.R.; Boluk, Y.; and Bindiganavile, V., "The Effect of Cellulose Nanocrystal (CNC) Particles on the Porosity and Strength Development in Oil Well Cement Paste," *Construction and Building Materials*, V. 205, No. 2, Apr. 2019, pp. 456-462.
8. Lee, H.-J., and Kim, W., "Long-Term Durability Evaluation of Fiber-Reinforced ECC Using Wood-Based Cellulose Nanocrystals,"

Construction and Building Materials, V. 238, Mar. 2020.

9. Goncalves, J.; Boluk, Y.; and Bindiganavile, V., "Cellulose Nanofibers Mitigate Chloride Ion Ingress in Cement-Based Systems," *Cement and Concrete Composites*, V. 114, Nov. 2020.

10. Kamasamudram, K.S.; Ashraf, W.; and Landis, E.N., "Cellulose Nanofibrils with and without Nanosilica for the Performance Enhancement of Portland Cement Systems," *Construction and Building Materials*, V. 285, May 2021.

11. Nassiri, S.; Chen, Z.; Jian, G.; Zhong, T.; Haider, M.M.; Li, H.; Fernandez, C.; Sinclair, M.; Varga, T.; Fifield, L.S.; and Wolcott, M., "Comparison of Unique Effects of Two Contrasting Types of Cellulose Nanomaterials on Setting Time, Rheology, and Compressive Strength of Cement Paste," *Cement and Concrete Composites*, V. 123, Oct. 2021.

12. Ramanathan, S.; Chopperla, K.S.T.; Isgor, O.B.; and Weiss, W.J., "Reducing GHG Emission Using Cellulose Nanocrystals, OPC, and Limestone," *ACI Materials Journal*, prepublished paper, Oct. 2022, 46 pp.

13. Zhang, Z., and Angst, U., "Microstructure and Moisture Transport in Carbonated Cement-Based Materials Incorporating Cellulose Nanofibrils," *Cement and Concrete Research*, V. 162, Dec. 2022.

14. Soroushian, P., and Ravanbakhsh, S., "Control of Plastic Shrinkage Cracking with Specialty Cellulose Fibers," *ACI Materials Journal*, V. 95, No. 4, July-Aug. 1998, pp. 429-435.

15. Kawashima, S., and Shah, S.P., "Early-Age Autogenous and Drying Shrinkage Behavior of Cellulose Fiber-Reinforced Cementitious Materials," *Cement and Concrete Composites*, V. 33, No. 2, Feb. 2011, pp. 201-208.

16. Neithalath, N.; Weiss, J.; and Olek, J., "Acoustic Performance and Damping Behavior of Cellulose-Cement Composites," *Cement and Concrete Composites*, V. 26, No. 4, May 2004, pp. 359-370.

17. Moon, R.J.; Schueneman, G.T.; and Simonsen, J., "Overview of Cellulose Nanomaterials, Their Capabilities and Applications," *JOM*, V. 68, No. 9, Sept. 2016, pp. 2383-2394.

18. Trache, D.; Hussin, M.H.; Haafiz, M.K.M.; and Thakur, V.K., "Recent Progress in Cellulose Nanocrystals: Sources and Production," *Nanoscale*, V. 9, No. 5, Jan. 2017, pp. 1763-1786.

19. Nechyporchuk, O.; Belgacem, M.N.; and Bras, J., "Production of Cellulose Nanofibrils: A Review of Recent Advances," *Industrial Crops and Products*, V. 93, Dec. 2016, pp. 2-25.

20. Zhong, T.; Jian, G.; Chen, Z.; Wolcott, M.; Nassiri, S.; and Fernandez, C.A., "Interfacial Interactions and Reinforcing Mechanisms of Cellulose and Chitin Nanomaterials and Starch Derivatives for Cement and Concrete Strength and Durability Enhancement: A Review," *Nanotechnology Reviews*, V. 11, No. 1, Jan. 2022, pp. 2673-2713.

21. Habibi, Y., "Key Advances in the Chemical Modification of Nanocelluloses," *Chemical Society Reviews*, V. 43, No. 5, 2014, pp. 1519-1542.

Access to ACI University Learning

ACI Members receive free access to all ACI live webinars and 220+ on-demand courses.

- 12-month subscription available for non-members
- Multi-user options available

Visit www.concrete.org/aciuniversity to view all your access options

 **UNIVERSITY**

www.ACIUniversity.com

22. Sobolev, K., and Gutiérrez, M.F., "How Nanotechnology Can Change the Concrete World," *American Ceramic Society Bulletin*, V. 84, No. 11, Aug. 2014, pp. 113-116.

23. Hoover, K., and Hansion, L.A., "Wildfire Statistics," IN FOCUS, IF10244, Congressional Research Service, Washington, DC, 2022, <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/IF/IF10244>.

24. Dillon, G.K.; Menakis, J.; and Fay, F., "Wildland Fire Potential: A Tool for Assessing Wildfire Risk and Fuels Management Needs," USDA Forest Service Proceedings RMRS-P-73, 2015, pp. 60-76, www.fs.usda.gov/rm/pubs/rmrs_p073/rmrs_p073_060_076.pdf.

25. Montes, F.; Fu, T.; Youngblood, J.P.; and Weiss, J., "Rheological Impact of Using Cellulose Nanocrystals (CNC) in Cement Pastes," *Construction and Building Materials*, V. 235, Feb. 2020.

26. Cao, Y.; Zavaterra, P.; Youngblood, J.; Moon, R.; and Weiss, J., "The Influence of Cellulose Nanocrystal Additions on the Performance of Cement Paste," *Cement and Concrete Composites*, V. 56, Feb. 2015, pp. 73-83.

27. Cao, Y.; Tian, N.; Bahr, D.; Zavattieri, P.D.; Youngblood, J.; Moon, R.J.; and Weiss, J., "The Influence of Cellulose Nanocrystals on the Microstructure of Cement Paste," *Cement and Concrete Composites*, V. 74, Nov. 2016, pp. 164-173.

28. Valadez, Y.; Washington, T.; Ghantous, R.; Ramanathan, S.; Chopperla, K.S.T.; Mateos, A.; Harvey, J.; Isgor, O.B.; and Weiss, W.J., "P3Nano – Advancing Commercialization of Cellulosic Nanomaterials," U.S. Endowment for Forestry and Communities, Greenville, SC, 2020, 107 pp.

29. Hooton, R.D.; Nokken, M.; and Thomas, M.D.A., "Portland-Limestone Cement: State-Of-The-Art Report and Gap Analysis for CSA A3000," Report SN3053, Cement Association of Canada, Ottawa, ON, Canada, Jan. 2007, 60 pp.

30. Tennis, P.; Thomas, M.D.A.; and Weiss, W.J., "State-of-the-Art Report on Use of Limestone in Cements at Levels of up to 15%," PCA R&D SN3148, Portland Cement Association, Skokie, IL, 2011, 74 pp.

31. ACI Committee 214, "Guide to Evaluation of Strength Test Results of Concrete (ACI 214R-11) (Reapproved 2011)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2019, 20 pp.

Note: Additional information on the ASTM standards discussed in this article can be found at www.astm.org.

Selected for reader interest by the editors.

Sign up for Concrete SmartBrief

Created by SmartBrief in partnership with ACI, Concrete SmartBrief provides a daily e-mail snapshot of the concrete industry with news from leading global sources. Summaries of what matters to you, written by expert editors, to save you time and keep you informed and prepared.

Welcome to Concrete SmartBrief; sign up at:

www.smartbrief.com/ACI



Krishna Siva Teja Chopperla is a Postdoctoral Researcher at Oregon State University, Corvallis, OR, USA. His research interests include concrete durability, characterization of cementitious materials, alternative supplementary cementitious materials, and low-carbon concrete.



Sivakumar Ramanathan is a Postdoctoral Researcher at Oregon State University. His research interests include supplementary cementitious materials, alternative cementitious materials, and concrete durability. He received his PhD from the University of Miami, Coral Gables, FL, USA.



Robert J. Moon is a Materials Research Engineer at the USDA Forest Service - Forest Products Laboratory and is an Adjunct Professor in both the School of Materials Engineering at Purdue University, West Lafayette, IN, USA, and the School of Materials Science and Engineering at the Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, USA. Since

2007, he has worked in various aspects of research, development, and use of cellulose nanomaterials. He has over 60 peer-reviewed papers in SCI-ranked journals on cellulose nanomaterials, including several critical review papers.



O. Burkan Isgor is a Professor in the School of Civil and Construction Engineering at Oregon State University. His research interests include corrosion of steel in concrete, the durability of concrete, and reactive-transport and thermodynamic modeling of cementitious systems. He is Chair of ACI Committee 222, Corrosion of Metals

in Concrete, and a member of ACI Committees 236, Material Science of Concrete, and 365, Service Life Prediction.



W. Jason Weiss is the Edwards Distinguished Professor of Engineering in the School of Civil and Construction Engineering at Oregon State University. He is Editor in Chief of the *ACI Materials Journal*, a member of the ACI Technical Activities Committee (TAC), and a member of the ACI Board of Direction.

Demostraciones de campo utilizando nanomateriales de celulosa como aditivos para concreto

por Krishna Siva Teja Chopperla, Sivakumar Ramanathan, Robert J. Moon, O. Burkan Isgor y W. Jason Weiss

Los nanomateriales de celulosa (CNMs) se derivan principalmente de la biomasa forestal. Los CNMs no son tóxicos, son biodegradables,¹ y pueden ser producidos a partir del exceso de biomasa que de otro modo alimentaría los incendios forestales. Estudios de laboratorio han demostrado que el uso de CNM en mezclas de pasta de cemento puede tener el potencial de aumentar la reacción del clínker, mejorar la resistencia a la flexión y reducir el transporte de iones.²⁻¹³ Este artículo describe tres ensayos de campo diseñados para evaluar el potencial de uso de CNMs en el concreto para aplicaciones a gran escala.

¿Qué son los CNMs?

La celulosa en forma de fibras se ha utilizado durante mucho tiempo en el concreto, y son eficaces para reducir la contracción plástica y el agrietamiento por contracción.^{14,15} Las fibras de celulosa también se han utilizado en productos comerciales para el revestimiento de paneles de cemento.¹⁶ La investigación en la última década ha estudiado los materiales de celulosa en una menor escala (nanoescala). Los CNMs son nanopartículas a base de celulosa con propiedades y funcionalidades distintos de estos materiales tradicionales de celulosa.¹⁷

Los CNMs tienen un amplio espectro de formas, tamaños y química que surgen de tres factores principalmente: 1) la fuente de celulosa; 2) el método de extracción/producción; y 3) la química superficial. Los CNMs se han producido a partir de una amplia variedad de fuentes de celulosa, incluyendo plantas, árboles, productos de papel reciclado, pulpa de zanahoria y cáscaras de coco.¹⁸⁻²⁰ La producción de CNMs es un proceso de varias fases diseñado para la fuente específica de celulosa. Generalmente, la producción consiste en un pretratamiento para purificar y homogeneizar la fuente de material, seguido de refinamiento en partículas de tamaño nanométrico. Se utilizan dos enfoques principales de refinamiento: acción mecánica e hidrólisis ácida. El primer proceso rasga la fuente separando el material y crea partículas de tamaño nanométrico con morfología de tipo fibrilar (micras de largo, nanómetros de ancho y a menudo ramificado).¹⁹ Estas partículas se llaman nanofibrillas de celulosa (CNFs). El último proceso disuelve las regiones desordenadas del material de origen, creando partículas de tamaño nanométrico con morfología tipo fusiforme (nanómetros de longitud y ancho, con extremos cónicos).¹⁸ Estas partículas se llaman nanocristales de celulosa (CNCs). La química superficial y otras características de los CNFs y CNCs pueden resultar como producto del método de fabricación de los CNM o modificación química posterior.²¹

Los CNC producidos a partir de madera suelen tener longitudes de 50 a 350 nm, anchos de 5 a 20 nm y relaciones de aspecto de 5 a 30. Para poner esto en perspectiva, esto es similar a la escala de nanosílice, sílice precipitada y humo de sílice, pero aproximadamente 100 veces más pequeño que el tamaño de partícula del cemento portland de 1 a 50 μm .^{4,5,22} La Figura 1 muestra una imagen de un CNC en un microscopio electrónico de transmisión (TEM) producido en una planta piloto ubicada en el Laboratorio de Productos Forestales (FPL) del Servicio Forestal de los Estados Unidos.

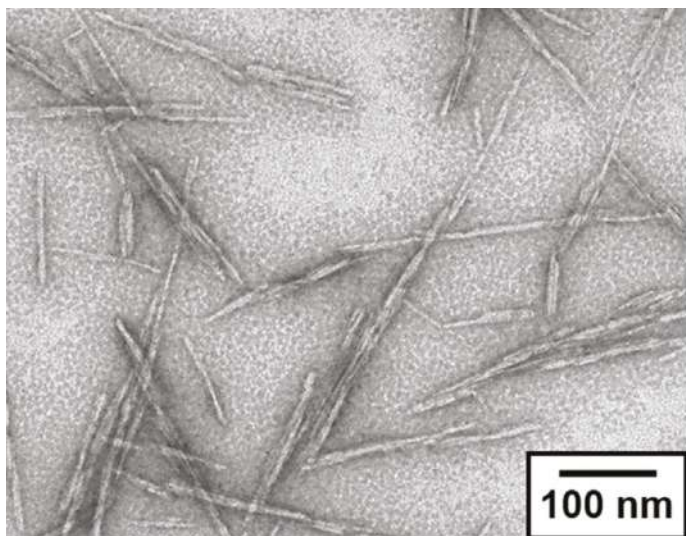


Figura 1: Imagen TEM de CNC de madera producido en la planta piloto de CNC ubicada en el Servicio Forestal de los Estados Unidos, Laboratorio de Productos Forestales. Reimpreso de la Referencia 17 con permiso de Springer

CNMs -- La Perspectiva del Servicio Forestal

CNM tiene un nivel único de importancia para el Servicio Forestal de los Estados Unidos en términos de mejora del uso de los recursos forestales y manejo de tierras forestales. La gestión de tierras forestales incluye la eliminación del exceso de biomasa forestal, como maleza, ramas y árboles de pequeño diámetro; por lo tanto es un efectivo enfoque para reducir el riesgo de incendios forestales catastróficos minimizando la "carga de combustible". Con datos recientes que muestran un total de más de 50,000 incendios forestales en los Estados Unidos,²³ la eliminación del exceso de biomasa es claramente de alta prioridad.

El raleo mecánico cuesta alrededor de \$1000 USD por acre (0,4 ha), y Estados Unidos

tiene millones de acres de tierras forestales que necesitan la restauración de la biomasa forestal.²⁴ Como los CNMs se pueden producir a partir de biomasa de bajo valor, la producción de CNMs ofrece una oportunidad de compensar el costo de eliminar el exceso de biomasa forestal.

Los beneficios de la producción de CNMs generalmente incluyen: 1) reducción de la probabilidad de incendios forestales catastróficos; 2) frenar las emisiones de gases de efecto invernadero (GHG) de la descomposición de la biomasa; y 3) proporcionar un producto de valor agregado en otras industrias como la construcción.

CNM como aditivo para materiales cementantes

La adición de CNMs a los materiales cementantes ha demostrado alterar la reología, los tiempos de fraguado, el grado de hidratación, y propiedades mecánicas.^{4,5} Dosis bajas (<0,3% por volumen de cementante) de los CNCs reducen el esfuerzo de fluencia de la pasta y mejoran la trabajabilidad del concreto. Por el contrario, dosis más altas de CNCs (> 0,3% por volumen de cementante) aumentan el esfuerzo de fluencia de la pasta y reducen la trabajabilidad, ya que los CNCs tienden a aglomerarse.^{2,25} La adición de CNCs retrasa el tiempo de fraguado del concreto en aproximadamente 2 a 3 horas debido a la adsorción de los CNCs en los granos de cemento²; sin embargo, los CNCs también aceleran la velocidad de reacción después de iniciado el fraguado. Trabajos anteriores han planteado la hipótesis de que la adsorción preferencial de CNCs en los granos de cemento genera la formación de vías para que las moléculas de agua ingresen a través de las capas de silicato de calcio hidratado (C-S-H) alrededor de los granos de cemento (llamada difusión de cortocircuito) y aumenta el grado de hidratación del sistema, lo que resulta en un uso más eficiente del cementante.^{4,5,26,27} Este aumento en la hidratación del cemento puede ser especialmente frecuente en edades posteriores.²⁸ La adición de CNCs a algunos sistemas cementantes ha demostrado mejorar las propiedades mecánicas como la resistencia

a la flexión (hasta un 20 a 30%) y propiedades de transporte al mejorar el grado de hidratación del cemento y reduciendo la conectividad de los poros.^{4,5,12,26,27}

Mientras que la norma ASTM C595, “Especificación estándar para Cementos Hidráulicos Adicionados”, permite cementos que contienen hasta un 15% de piedra caliza (Tipo IL o cemento portland de piedra caliza [PLC]),^{29,30} el incremento en la reacción del clínker que ofrecen las adiciones de CNCs ofrece oportunidades para reducir aún más el contenido de clínker. Un estudio reciente mostró que la adición de CNCs permitió mayores cantidades de piedra caliza (hasta un 22% en total) en adiciones realizadas con cemento portland ordinario (OPC) y piedra caliza sin comprometer las propiedades mecánicas y de transporte.¹² Aunque prometedor, se requiere investigación adicional para evaluar los efectos de los CNCs en mezclas con materiales cementantes suplementarios y una amplia gama de clinkers.

Demostraciones de campo del uso de CNCs en concreto

Se seleccionaron tres proyectos para demostrar que los CNCs podrían usarse en la colocación de concreto a gran escala. El primer proyecto fue para el pavimento de un estacionamiento en Greenville, Carolina del Sur, EE. UU., en 2018. El segundo fue para un puente de concreto prefabricado construido en Yreka, CA, EE. UU., en 2020. El tercero fue para losas sobre suelo construidas en Corvallis, OR, EE. UU., en 2022. La planta piloto de FPL preparó los CNCs utilizados en los proyectos, y los CNCs se utilizaron en forma de lodos que no se habían secado.

Estacionamiento, Greenville, SC

Este proyecto demostró la implementación exitosa de los CNCs en una estructura de concreto a gran escala sin problemas en cuanto a trabajabilidad, acabado y fraguado. El estacionamiento fue construido empleando un volumen de concreto de 46 m³ (60 yd³) que contiene los CNCs (dosificado al 0,2% de volumen sólido de CNCs por volumen de cemento) y

un volumen de 9 m³ (12 yd³) de concreto convencional (como referencia). Ambos tipos de concreto se dosificaron utilizando procesos similares; sin embargo, para el concreto con los CNCs, la suspensión de CNCs se agregó manualmente al camión de concreto después de dosificar los otros ingredientes (el agua de mezclado se redujo para compensar el agua en la suspensión). Las proporciones de la mezcla se muestran en la Tabla 1. Ambas mezclas incluyen cantidades similares de todos los demás materiales, incluidos los aditivos inclusores de aire (AEA) y aditivo reductor de agua de alto rango (HRWRA). La Figura 2 muestra la colocación de la mezcla con los CNCs.

Ambas mezclas tenían resistencias a la compresión a los 28 días que superaban la resistencia de diseño de 28 MPa (4000 psi). El concreto de referencia tenía una resistencia a la compresión a los 28 días de 36 ± 0,2 Mpa (5281 ± 26 psi), mientras que el concreto con CNC tenía una resistencia a la compresión a los 28 días de 33 ± 0,5 Mpa (4718 ± 76 psi). El coeficiente de variación entre camiones para las dos resistencias a la compresión medidas fue del 6%, lo cual está dentro de la variación aceptable entre camiones discutida en ACI 214R-11.31 Las resistencias a la tracción indirecta a los 56 días del concreto simple y concreto con CNC fueron 2,9 ± 0,2 Mpa (427 ± 36 psi) y 2,7 ± 0,4 Mpa (385 ± 58 psi), respectivamente, y eran estadísticamente similares. Este trabajo indicó que los CNCs podrían usarse en aplicaciones con lotes de concreto a gran escala y su colocación en campo.

Tabla 1: Proporciones de mezcla de concreto para Greenville, SC, estacionamiento.

Material	Mezcla base	Mezcla con 0,2% CNC
a/cm	0.41	0.41
Cemento tipo I/II, kg/m ³	353	311
Ceniza volante, kg/m ³	89	89
Arena natural, kg/m ³	197	197
Arena manufacturada, kg/m ³	460	460
Agregado grueso, kg/m ³	1068	1068
CNC sólido, kg/m ³	0	0
Agua, kg/m ³	163	163
Aire, %	3.0 a 6.0	3.0 a 6.0

Nota: a/cm es relación agua-materiales cementantes; 1 kg/m³ = 1.68 lb/ yd³ kg/m³



Figura 2: Colocación de la mezcla con CNC al 0.2% para el estacionamiento

Vigas de puente, Yreka, CA

El segundo proyecto de demostración fue la construcción de un Puente de viga cajón pretensado como reemplazo de un puente existente que cruza Moffett Creek en Yreka, CA. Las vigas fueron fabricadas en la planta Knife River Prestress en Harrisburg, OR. Cada viga tenía 8,827 m de largo, 1,048 de ancho y 0,305 m de alto (28 pies-11,5 in. x 3 pies-5,25 in. x 12 in.), y cada una pesaba 8165 kg (18000 libras). La resistencia a la compresión de diseño fue 41 Mpa (6000 psi) con un esfuerzo de liberación de 34 MPa (4900 psi).

Se utilizaron dos mezclas: un concreto con CNC (dosificada al 0,1% de volumen sólido de CNC por volumen de cemento) y una mezcla de referencia. Aditivos de conservación de la trabajabilidad, AEA y HRWRA se usaron en cantidades similares para ambas mezclas. Las proporciones de las mezclas se muestran en la Tabla 2. La Figura 3 muestra la colocación del concreto con CNC en las vigas.

El asentamiento medido fue de 180 y 150 mm (7 y 6 pulgadas) para la mezcla de referencia y el concreto con CNC, respectivamente. El contenido de aire medido en el concreto de referencia y la mezcla con CNC fue de 4,0% y 5,8%, respectivamente. La resistencia a la compresión a los 28 días de la mezcla de referencia fue 61 ± 2 Mpa (8900 ± 286 psi), mientras que el concreto con CNC tenía una resistencia de 65 ± 3 Mpa (9480 ± 488 psi); ambas mezclas excedieron la resistencia de diseño de 41Mpa (6000 psi). Las resistencias a la compresión a los 28 días de ambas mezclas fueron estadísticamente similares. La resistencia a la tracción indirecta a los 28 días de la mezcla con CNC ($9 \pm 0,6$ Mpa [1321 ± 80 psi]) fue similar a la de la mezcla de referencia ($9 \pm 0,3$ Mpa [1273 ± 46 psi]). Esta resistencia similar de la mezcla con CNC, a pesar del mayor contenido de aire en el concreto con CNC (que podría esperarse que reduzca la resistencia), se atribuye a un aumento en el grado de hidratación del cemento. Las vigas cajón cumplieron con todas las especificaciones y fueron transportadas al sitio del proyecto, donde fueron instaladas por el personal del condado local (Fig. 4). El proyecto demostró con éxito que se podía agregar CNC a las mezclas de concreto con resultados similares o desempeño potencialmente mejorado.

Tabla 2: Proporciones de mezcla de concreto para vigas cajón.

Material	Mezcla base	Mezcla con 0,1% CNC
a/cm	0.36	0.36
Cemento tipo III, kg/m ³	422	426
Agregado ¾ a ½ in., kg/m ³	351	357
Agregado ½ in. a No. 4, kg m ³	681	673
Arena, kg/m ³	719	722
Agua, kg/m ³	148	148
CNC suspensión, kg/m ³	0	2.14

Nota: a/cm es relación agua-materiales cementantes; 1 kg/m³ = 1.68 lb/yd³ kg/m³



Figura 3: La mezcla con CNC al 0,1 % se coloca y se vibra en el encofrado de vigas tipo cajón pretensadas



Figura 4: Colocación de las vigas cajón

Losas sobre el suelo, Corvallis, OR

La tercera demostración consistió en losas sobre suelo colocado en la escuela secundaria Linus Pauling en Corvallis, OR, para su uso como aula al aire libre. Tres losas y una pasarela se colocaron utilizando cuatro mezclas. Las mezclas se describen en la Tabla 3 e incluyen una mezcla de referencia (OPC-CNC0.0), una mezcla con CNC dosificada al 0,2% en volumen

sólido de CNC por volumen de cemento (OPC-CNC0.2), una mezcla con piedra caliza triturada en sustitución del 20% de cemento (LS20-CNC0.0), y una mezcla con piedra caliza triturada reemplazando el 20% del cemento y con CNC dosificado al 0,2% de volumen sólido de CNC por volumen de cemento (LS20-CNC0.2). Las losas tenían 41 pies de ancho, 14 pies de largo, y 5 pulg. de espesor (12,5 m x 4,3 m x 127 mm). La pasarela tenía aproximadamente 16 pies de largo, 3 pies de ancho y 5 pulgadas de espesor (5 m x 1 m x 127 mm). La resistencia de diseño a los 28 días fue de 3500 psi (24 MPa), el asentamiento objetivo era de 4 a 6 pulg. (102 a 152 mm), y el contenido de aire fue $5 \pm 1,5\%$. La Tabla 3 muestra las proporciones de las mezclas. La Figura 5 muestra el sitio después de colocar todas las losas. Todas las mezclas lograron el asentamiento y el contenido de aire deseado. Las resistencias a la compresión a los 28 días fueron 5250 ± 546 psi (36 ± 4 MPa) para OPC-CNC0.0, 5173 ± 470 psi (36 ± 3 MPa) para OPC-CNC0.2, 4113 ± 154 psi (28 ± 1 MPa) para LS20-CNC0.0 y 3840 ± 251 psi (26 ± 2 MPa) para LS20-CNC0.2. La diferencia en los valores de resistencia entre el CNC y la mezcla sin CNC fue del 1,5 % para las mezclas OPC y del 7 % para las mezclas LS20, y las resistencias fueron estadísticamente similares para las mezclas con y sin CNC. Las mezclas LS20 tuvieron aproximadamente un 20% menos de emisiones de GHG en comparación con las mezclas con OPC debido a un mayor contenido de piedra caliza y un menor contenido de clínker en las mezclas LS20. Esta parte del proyecto demostró con éxito el uso de CNC en mezclas de bajo carbono fabricadas reemplazando OPC por piedra caliza a gran escala en aplicaciones de campo. Se está trabajando para estudiar la durabilidad a largo plazo de las mezclas convencionales con CNCs y mezclas de concreto de bajo carbono.

Tabla 3: Proporciones de mezcla de concreto colocadas en Corvallis, OR.

Material	OPC-NCC0.0	OPC-NCC0.2	LS20-NCC0.0	LS20-NCC0.2
a/cm	0.588	0.534	0.543	0.508
Cemento tipo OPC, kg/m ³	311	309	251	249
Caliza, kg/m ³	0	0	67	67
Agregado grueso (3/4 in), kg/m ³	1007	1008	1004	1014
Arena, kg/m ³	798	787	791	791
Agua, kg/m ³	183	165	173	161
NCC, kg/m ³	0	2.89	0	2.98

Nota: a/cm es relación agua-materiales cementantes; 1 kg/m³ = 1.685 lb/yd³ kg/m³; 25 mm= 1 in



Figura 5: El sitio después de colocar las losas y la pasarela.

Conclusiones

Los ensayos de campo descritos en este artículo mostraron que mezclas de concreto con CNC se pueden producir, transportar, y ser colocadas de manera similar a las mezclas de concreto convencionales. Las mezclas con CNC mostraron un rendimiento similar a mezclas convencionales en términos de trabajabilidad y resistencia. Se está trabajando más para monitorear la durabilidad a largo plazo y el desempeño de mezclas de concreto con CNCs en campo.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero de los EE.UU. Fondo para la Silvicultura y las Comunidades.

Referencias

1. Moon, R.J.; Martini, A.; Nairn, J.; Simonsen, J.; and Youngblood, J., "Cellulose Nanomaterials Review: Structure, Properties and Nanocomposites," *Chemical Society Reviews*, V. 40, No. 7, July 2011, pp. 3941-3994.
2. Cao, Y., "Nano-Modification for High-Performance Cement Composites with Cellulose NanoCrystals and Carbon Nanotubes," PhD dissertation, Purdue University, West Lafayette, IN, 2014, 209 pp.

3. Sun, X.; Wu, Q.; Lee, S.; Qing, Y.; and Wu, Y., "Cellulose Nanofibers as a Modifier for Rheology, Curing and Mechanical Performance of Oil Well Cement," *Scientific Reports*, V. 6, No. 1, Aug. 2016, pp. 1-9.
4. Fu, T.; Moon, R.J.; Zavattieri, P.; Youngblood, J.; and Weiss, W.J., "Cellulose Nanomaterials as Additives for Cementitious Materials," *Cellulose-Reinforced Nanofibre Composites: Production, Properties and Applications*, M. Jawaid, S. Boufi, and A. Khalil, eds., Woodhead Publishing, Sawston, UK, 2017, pp. 455-482.
5. Fu, T.; Montes, F.; Suraneni, P.; Youngblood, J.; and Weiss, W.J., "The Influence of Cellulose Nanocrystals on the Hydration and Flexural Strength of Portland Cement Pastes," *Polymers*, V. 9, No. 9, Sept. 2017, 16 pp.
6. Haddad Kolour, H.; Ahmed, M.; Alyaseen, E.; and Landis, E.N., "An Investigation on the Effects of Cellulose Nanofibrils on the Performance of Cement Paste and Concrete," *Advances in Civil Engineering Materials*, V. 7, No. 1. Sept. 2018, 15 pp.
7. Dousti, M.R.; Boluk, Y.; and Bindiganavile, V., "The Effect of Cellulose Nanocrystal (CNC) Particles on the Porosity and Strength Development in Oil Well Cement Paste," *Construction and Building Materials*, V. 205, No. 2, Apr. 2019, pp. 456-462.
8. Lee, H.-J., and Kim, W., "Long-Term Durability Evaluation of Fiber-Reinforced ECC Using Wood-Based Cellulose Nanocrystals," *Construction and Building Materials*, V. 238, Mar. 2020.
9. Goncalves, J.; Boluk, Y.; and Bindiganavile, V., "Cellulose Nanofibers Mitigate Chloride Ion Ingress in Cement-Based Systems," *Cement and Concrete Composites*, V. 114, Nov. 2020.
10. Kamasamudram, K.S.; Ashraf, W.; and Landis, E.N., "Cellulose Nanofibrils with and without Nanosilica for the Performance Enhancement of Portland Cement Systems," *Construction and Building Materials*, V. 285, May 2021.
11. Nassiri, S.; Chen, Z.; Jian, G.; Zhong, T.; Haider, M.M.; Li, H.; Fernandez, C.; Sinclair, M.; Varga, T.; Fifield, L.S.; and Wolcott, M., "Comparison of Unique Effects of Two Contrasting Types of Cellulose Nanomaterials on Setting Time, Rheology, and Compressive Strength of Cement Paste," *Cement and Concrete Composites*, V. 123, Oct. 2021.
12. Ramanathan, S.; Chopperla, K.S.T.; Isgor, O.B.; and Weiss, W.J., "Reducing GHG Emission Using Cellulose Nanocrystals, OPC, and Limestone," *ACI Materials Journal*, pre-published paper, Oct. 2022, 46 pp.

13. Zhang, Z., and Angst, U., "Microstructure and Moisture Transport in Carbonated Cement-Based Materials Incorporating Cellulose Nanofibrils," *Cement and Concrete Research*, V. 162, Dec. 2022.

14. Soroushian, P., and Ravanbakhsh, S., "Control of Plastic Shrinkage Cracking with Specialty Cellulose Fibers," *ACI Materials Journal*, V. 95, No. 4, July-Aug. 1998, pp. 429-435.

15. Kawashima, S., and Shah, S.P., "Early-Age Autogenous and Drying Shrinkage Behavior of Cellulose Fiber-Reinforced Cementitious Materials," *Cement and Concrete Composites*, V. 33, No. 2, Feb. 2011, pp. 201-208.

16. Neithalath, N.; Weiss, J.; and Olek, J., "Acoustic Performance and Damping Behavior of Cellulose-Cement Composites," *Cement and Concrete Composites*, V. 26, No. 4, May 2004, pp. 359-370.

17. Moon, R.J.; Schueneman, G.T.; and Simonsen, J., "Overview of Cellulose Nanomaterials, Their Capabilities and Applications," *JOM*, V. 68, No. 9, Sept. 2016, pp. 2383-2394.

18. Trache, D.; Hussin, M.H.; Haafiz, M.K.M.; and Thakur, V.K., "Recent Progress in Cellulose Nanocrystals: Sources and Production," *Nanoscale*, V. 9, No. 5, Jan. 2017, pp. 1763-1786.

19. Nechyporchuk, O.; Belgacem, M.N.; and Bras, J., "Production of Cellulose Nanofibrils: A Review of Recent Advances," *Industrial Crops and Products*, V. 93, Dec. 2016, pp. 2-25.

20. Zhong, T.; Jian, G.; Chen, Z.; Wolcott, M.; Nassiri, S.; and Fernandez, C.A., "Interfacial Interactions and Reinforcing Mechanisms of Cellulose and Chitin Nanomaterials and Starch Derivatives for Cement and Concrete Strength and Durability Enhancement: A Review," *Nanotechnology Reviews*, V. 11, No. 1, Jan. 2022, pp. 2673-2713.

21. Habibi, Y., "Key Advances in the Chemical Modification of Nanocelluloses," *Chemical Society Reviews*, V. 43, No. 5, 2014, pp. 1519-1542.

22. Sobolev, K., and Gutiérrez, M.F., "How Nanotechnology Can Change the Concrete World," *American Ceramic Society Bulletin*, V. 84, No. 11, Aug. 2014, pp. 113-116.

23. Hoover, K., and Hansion, L.A., "Wildfire Statistics," IN FOCUS, IF10244, Congressional Research Service, Washington, DC, 2022, <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/IF/IF10244>.

24. Dillon, G.K.; Menakis, J.; and Fay, F., "Wildland Fire Potential: A Tool for Assessing Wildfire Risk and Fuels Management Needs," *USDA Forest Service Proceedings RMRS-P-73*, 2015, pp. 60-76, www.fs.usda.gov/rm/pubs/rmrs_p073/rmrs_p073_060_076.pdf. 25. Montes, F.; Fu, T.;

Youngblood, J.P.; and Weiss, J., "Rheological Impact of Using Cellulose Nanocrystals (CNC) in Cement Pastes," *Construction and Building Materials*, V. 235, Feb. 2020.

26. Cao, Y.; Zavatteri, P.; Youngblood, J.; Moon, R.; and Weiss, J., "The Influence of Cellulose Nanocrystal Additions on the Performance of Cement Paste," *Cement and Concrete Composites*, V. 56, Feb. 2015, pp. 73-83.

27. Cao, Y.; Tian, N.; Bahr, D.; Zavattieri, P.D.; Youngblood, J.; Moon, R.J.; and Weiss, J., "The Influence of Cellulose Nanocrystals on the Microstructure of Cement Paste," *Cement and Concrete Composites*, V. 74, Nov. 2016, pp. 164-173.

28. Valadez, Y.; Washington, T.; Ghantous, R.; Ramanathan, S.; Chopperla, K.S.T.; Mateos, A.; Harvey, J.; Isgor, O.B.; and Weiss, W.J., "P3Nano – Advancing Commercialization of Cellulosic Nanomaterials," *U.S. Endowment for Forestry and Communities, Greenville, SC*, 2020, 107 pp.

29. Hooton, R.D.; Nokken, M.; and Thomas, M.D.A., "Portland Limestone Cement: State-Of-The-Art Report and Gap Analysis for CSA A3000," *Report SN3053*, Cement Association of Canada, Ottawa, ON, Canada, Jan. 2007, 60 pp.

30. Tennis, P.; Thomas, M.D.A.; and Weiss, W.J., "State-of-the-Art Report on Use of Limestone in Cements at Levels of up to 15%," *PCA R&D SN3148*, Portland Cement Association, Skokie, IL, 2011, 74 pp.

31. ACI Committee 214, "Guide to Evaluation of Strength Test Results of Concrete (ACI 214R-11) (Reapproved 2011)," *American Concrete Institute*, Farmington Hills, MI, 2019, 20 pp.

Nota: Información adicional sobre las normas ASTM discutidas en este artículo se puede encontrar en www.astm.org.

La traducción de este artículo correspondió al Capítulo de Colombia

Título: Demostraciones de campo utilizando nanomateriales de celulosa como aditivos para concreto



*Traductor y Revisor Técnico:
Margareth Dugarte Coll, PhD.*



Krishna siva teja chopperla, es un investigador postdoctoral en Oregon State U Oregon State University niversity, Corvallis, Oregón, EE. UU. Sus intereses de investigación incluyen durabilidad del concreto, caracterización de materiales cementantes, materiales cementantes suplementarios alternativos, y concreto bajo en carbono.



Sivakumar Ramanathan, es un investigador postdoctoral en Oregon State U Oregon State University niversity, Corvallis, Oregón, EE. UU. Sus intereses de investigación incluyen durabilidad del concreto, caracterización de materiales cementantes, materiales cementantes suplementarios alternativos, y concreto bajo en carbono.



Robert J. Monn es un Ingeniero investigador de materiales en el Servicio Forestal del USDA - Laboratorio de Productos Forestales y es un profesor adjunto en la Escuela de Ingeniería de Materiales en Purdue University, West Lafayette, IN, EE. UU., y en la Escuela de Ciencias de los Materiales e Ingeniería en Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, EE. UU. Desde 2007, ha trabajado en varios aspectos de la investigación, desarrollo y uso de los nanomateriales de celulosa. Tiene más de 60 artículos revisados por pares en revistas clasificadas por SCI sobre nanomateriales de celulosa, incluidos varios artículos de revisión.



O. Burkan isgor es profesor en la Escuela de Ingeniería Civil y Construcción en Oregon State University. Sus intereses de investigación incluyen la corrosión del acero en el concreto, la durabilidad del concreto, y el transporte y modelación termodinámica en sistemas cementantes. Es presidente del Comité 222 de ACI, Corrosión de metales en el concreto, y es miembro de los Comités ACI 236, Ciencia de los materiales del concreto y ACI 365, Predicción de vida útil.



W. Jason Welss es Profesor Distinguido "Edwards" de la Escuela de Ingeniería Civil y Construcción en Oregon State University. Es editor en jefe de la revista ACI Materials, miembro del Comité técnico de actividades del ACI y miembro de la Junta Directiva del ACI.