UNICIT
UNIVERSIDAD IBEROAMERICANA
DE CIENCIA Y TECNOLOGIA

Estudio de mezcla de concreto orientado a postes pretensados centrifugados en Postes de Nicaragua S.A. (POSTENIC, S.A.)

Monografía para optar al Título de Ingeniero Civil

Autores:

Br. Josué Alexander Estrada García

Br. Gerzon Jafet Aburto Martínez

Br. Joshua David Morales Alfaro

Docente:

Msc. Javier Delgado

Asesor:

Ing. Yasser Hakssey Castillo

Managua, Nicaragua. Julio 2026.

Acrónimos.

1. ACI: American Concrete Institute
2. ASCE: American Society of Civil Engineers
3. ASCE CPD: American Society of Civil Engineers – Concrete Pole Design (guía para el diseño de postes de concreto).
4. ASTM: American Society for Testing and Materials.
5. DISNORTE: Distribuidora Nicaragüense de Electricidad (Empresa de Transmisión).
6. 18. DISSUR: Distribuidora Nicaragüense de Electricidad (Empresa de Distribución).
7. ENACAL: Empresa Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados Sanitarios.
8. NTON: Norma Técnica Obligatoria Nicaragüense.
9. POSTENIC S.A.: Postes de Concretos de Nicaragua, Sociedad Anónima.

Otras siglas y Normas.

1. ACI 211: American Concrete Institute Committee 211 – Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete
2. ACI 318: American Concrete Institute Committee 318 – Building Code Requirements for Structural Concrete
3. ACI 214: American Concrete Institute Committee 214 – Guide to Evaluation of Strength Test Results of Concrete
4. ASTM C31: Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field
5. ASTM C39: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens
6. ASTM C94: Standard Specification for Ready-Mixed Concrete
7. ASTM C127: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate

8. ASTM C128: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate
9. ASTM C136: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates
10. ASTM C143: Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete
11. ASTM C566: Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying
12. ASTM C1157: Standard Performance Specification for Hydraulic Cement
13. HE: Alta Resistencia Inicial (tipo de cemento)
14. ISO 9001: International Organization for Standardization – Sistema de Gestión de Calidad
15. NIC-2019: Norma Nicaragüense de la Construcción
16. PSI: Pounds per Square Inch (libras por pulgada cuadrada – unidad de presión/resistencia)
17. SSD: Saturated Surface Dry (condición saturada con superficie seca de los agregados)
18. TMN: Tamaño Máximo Nominal (del agregado grueso)

Agradecimiento.

Agradezco a mis familiares por el apoyo constante principalmente a mi madre Pastora que no solo fue mi apoyo económico, si no esa persona que se preocupaba por conseguir el título, si no el apoyo maternal que siempre está en el camino de nosotros, por impulsarme a cumplir esta meta importante en mi vida, a los maestros que a pesar de los errores siempre me dieron su mano amiga como apoyo y como guía en el camino, alentando con palabras para seguir adelante, brindando su amistad, y principalmente a Dios por darme fuerzas para completar este largo camino que apenas inicia.

A la universidad por siempre brindar apoyo de muchas maneras, y al decano Rene Terrazas que siempre nos ayudaba e intercedía por nosotros.

Joshua David Morales Alfaro.

A nuestro Creador, por otorgarme el regalo de la vida y la oportunidad de culminar esta meta. A mi esposa y a mis padres, no existen palabras suficientes para expresar la magnitud de lo que han hecho por mí, pero este trabajo es una pequeña muestra de todo lo que se merecen. ¡Gracias totales!

Josue Alexander Estrada Garcia.

Expreso mi más sincero agradecimiento a Dios por guiar cada uno de mis pasos, darme fortaleza para superar los obstáculos y permitirme alcanzar esta importante meta académica.

A mi madre y a mi familia, por su amor, apoyo incondicional, comprensión y confianza durante todo este largo camino. Gracias por estar a mi lado en los momentos de alegría y también en los más difíciles.

Mi más profundo agradecimiento a todas las personas que, de una u otra manera, me brindaron su apoyo, sus consejos, su tiempo y su confianza a lo largo de este largo y difícil camino. Cada palabra de aliento, cada gesto de ayuda y cada muestra de confianza fueron fundamentales para no rendirme y seguir adelante hasta alcanzar esta meta.

A mis docentes y tutores, por compartir sus conocimientos, experiencia y orientación durante el desarrollo de esta monografía, contribuyendo significativamente a mi formación profesional.
Gerzon Jafet Aburto Martínez.

Dedicatoria

Dedico este logro a mis 3 madres y Dios primeramente, luego a mi familia ese apoyo incondicional, esos regaños con el objetivo de llegar a este punto, a mis profesores que nunca nos dieron un mal gesto, solo una amistad durante estos 5 años, que dieron su fruto y estoy tan cerca de conseguirlo, a las personas que han estado en el camino y han brindado su apoyo en momentos críticos de mi vida universitaria, a mis compañeros de clase que han sido de ayuda con las dudas, los problemas, que hemos compartido buenos y malos momentos, a mis compañeros con los que logramos ganar ferias universitarias sintiéndonos orgullosos de nuestro grupo y nuestra carrera.

También se lo dedico a las personas que iban a mi lado en este camino y hoy no me acompañan, pero fueron pieza fundamental para ayudarme a lograr un logro tan importante como este.

Joshua David Morales Alfaro.

Dedico este trabajo a los tres pilares de mi vida, mi esposa, mi madre y mi padre. Su amor incondicional y su apoyo inquebrantable son las bases de todo lo que soy. A mis padres, por su entrega absoluta, por una crianza excepcional y por dar su vida entera para que yo pudiera salir adelante. A mi esposa, por ser mi roca en los días difíciles y porque su sonrisa es, y siempre será, mi mayor felicidad.

Josue Alexander Estrada Garcia.

Dedico este trabajo, en primer lugar, a Dios, por darme la vida, la fortaleza, la sabiduría y la oportunidad de culminar una de las metas más importantes de mi vida.

A mi madre, a mi mamita y a mi mamá Fabi, por su amor, apoyo incondicional, sacrificio y confianza en mí durante todo este proceso. Cada uno de sus consejos y palabras de aliento fueron fundamentales para no rendirme en los momentos más difíciles.

También dedico este logro a todas las personas que creyeron en mí y me motivaron a seguir adelante. Este trabajo representa el esfuerzo, la perseverancia y la convicción de que, con dedicación y fe, los sueños pueden hacerse realidad.
Gerzon Jafet Aburto Martínez.

Resumen.

La planta Postes de Concretos de Nicaragua S.A., ubicada en Nindirí, Masaya, carecía de una dosificación documentada y de una memoria de cálculo que respaldara técnicamente las proporciones de su concreto. Esta situación generaba incertidumbre sobre las propiedades reales del material y dificultaba la adaptación a cambios en los insumos. Por ello, el presente estudio tuvo como objetivo desarrollar un diseño de mezcla formal, aplicando el método ACI 211.

Dado que no existían registros históricos de resistencia, se empleó el factor de seguridad de la Tabla 9-11 del ACI. Previamente, se caracterizaron todos los materiales disponibles: cemento tipo HE Holcim, agregado fino (material cero 1/4"), agregado grueso (3/4") y agua potable de ENACAL, verificando su cumplimiento con las normativas ASTM, NTON y NIC-2019. Con esta base, se definió una resistencia especificada de 6000 psi (422 kg/cm²), una relación agua/cemento de 0.43 y un revenimiento de 1 a 2 pulgadas.

La dosificación final en condición SSD resultó en 190 kg/m³ de agua, 441.86 kg/m³ de cemento, 814.9 kg/m³ de agregado fino y 1024.2 kg/m³ de agregado grueso. Se preparó una tanda de 0.41 m³ (equivalente a un poste de 40 pies) y se moldearon cilindros para ensayos de compresión a los 3, 7 y 28 días. Los resultados arrojaron un promedio de 6100 psi a los 28 días, superando la resistencia de diseño, con un desarrollo típico de cemento de alta resistencia inicial (74% a los 3 días y 93% a los 7 días).

El diseño cumple con las normativas ASCE CPD 1987, DISNORTE-DISSUR 2015 y ACI 318-19. Este trabajo representa el primer documento técnico de dosificación en la planta y sienta las bases para aplicar ACI 214, lo que permitirá reducir el factor de seguridad, optimizar el consumo de cemento y generar ahorros económicos a futuro.

Palabras clave.

Dosificación de concreto, Postes pretensados centrifugados, ACI 211,
Resistencia a compresión, Corrección por humedad.

Abstract

The Postes de Concretos de Nicaragua S.A. plant, located in Nindirí, Masaya, lacked a documented mix design and a calculation report that technically supported its concrete proportions. This situation created uncertainty regarding the actual properties of the material and made it difficult to adapt to changes in raw materials. Therefore, the objective of this study was to develop a formal concrete mix design by applying the ACI 211 method.

Since there were no historical records of compressive strength, the safety factor from Table 9-11 of ACI was used. Prior to the mix design, all available materials were characterized: Holcim Type HE cement, fine aggregate (0–1/4 in. material), coarse aggregate (3/4 in.), and ENACAL potable water, verifying compliance with ASTM, NTON, and NIC-2019 standards. Based on this characterization, a specified compressive strength of 6,000 psi (422 kg/cm²), a water-cement ratio of 0.43, and a slump of 1 to 2 inches were established.

The final mix design under SSD (Saturated Surface Dry) condition resulted in 190 kg/m³ of water, 441.86 kg/m³ of cement, 814.9 kg/m³ of fine aggregate, and 1,024.2 kg/m³ of coarse aggregate. A 0.41 m³ batch (equivalent to a 40-foot pole) was prepared, and cylinders were cast for compression testing at 3, 7, and 28 days. The results showed an average compressive strength of 6,100 psi at 28 days, exceeding the design strength, with a typical high early-strength cement development (74% at 3 days and 93% at 7 days).

The mix design complies with ASCE CPD 1987, DISNORTE-DISSUR 2015, and ACI 318-19 standards. This work represents the first technical mix design document for the plant and establishes the basis for implementing ACI 214, which will allow the reduction of the safety factor, optimization of cement consumption, and generation of future economic savings.

Keywords: Concrete mix design, centrifugally spun prestressed concrete poles, ACI 211, compressive strength, moisture correction.

Índice de contenidos.

..... 1

I. Introducción. 1

II. Contextualización de problema. 2

III. Planteamiento del problema. 4

IV. Justificación del estudio. 5

V. Objetivos. 8

V.1 Objetivo General. 8

V.2 Objetivos Específicos. 8

5.2.1 8

5.2.2 8

5.2.3 8

VI. Hipótesis de investigación. 9

VII. Alcances y Limitaciones. 10

VII.1 Alcance del estudio 10

VII.2 Limitaciones del estudio. 11

VIII. Marco Teórico 14

VIII.1 Antecedentes del estudio 14

VIII.2 Marco Contextual 16

VIII.3 Estado del arte 21

VIII.4 Bases teóricas. 23

VIII.5 Revisión de literatura previa 26

VIII.6 Variables. 27

VIII.7 Los indicadores asociados a cada variable. 29

VIII.8 Definiciones 30

IX. Diseño Metodológico de la Investigación. 35

IX.1 Enfoque de la investigación. 35

IX.2 Diseño de investigación. 36

IX.3 Población y muestra. 37

IX.4 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos 40
IX.5 Procedimientos 44
X. Resultados 49
X.1 Objetivo General 49
X.2 Objetivo específico 1 50
X.3 Objetivo específico 2 52
X.3.1 Revenimiento y trabajabilidad 52
X.3.2 Interpretación: vinculación con la ley de Abrams y las normas ACI 53
X.4 Objetivo específico 3 54
X.5 Hipótesis. 56
XI. Discusión. 57
XI.1 Interpretación de los resultados 57
XI.2 Comportamiento de la resistencia con el tiempo 57
XI.3 La relación agua/cemento y su importancia 58
XI.4 Trabajabilidad del concreto fresco 58
XI.5 Cumplimiento de normativas y mejora respecto a la situación inicial 58
XI.6 Limitaciones que encontramos 59
XI.7 ¿Qué significa esto para la planta? 60
XI.8 Recomendaciones para el futuro 60
XII. Conclusiones. 61
XIII. Recomendaciones. 65
XIII.1.1 Recomendaciones para la planta 65
XIII.1.2 Recomendaciones para futuras investigaciones 67
XIII.1.3 Recomendaciones para la universidad 69
XIV. Referencias bibliográficas. 70
XV. Anexos. 73

I. Introducción.

Este estudio se desarrolla en el año 2026 en la planta de postes de concreto pretensados centrifugados que opera en la comunidad de Veracruz, dentro del municipio de Nindirí, departamento de Masaya, Nicaragua. Dicha planta se dedica a la fabricación de estos elementos, destinados a redes de distribución eléctrica y alumbrado.

El presente estudio plantea la elaboración de un proporcionamiento de mezcla con una resistencia a la compresión ($f'c$) de 422 kg/cm^2 (6,000PSI) dado que en la operativa actual no se cuenta con una dosificación ni estudio de concreto desarrollado con criterios técnicos actualizados. Por tal razón, esta investigación tiene como propósito central desarrollar el proporcionamiento de mezcla de concreto para la fabricación de los postes, aplicando para ello un procedimiento de diseño basado en métodos reconocidos de dosificación.

El estudio se enfoca exclusivamente en la fase de diseño de la mezcla, sin involucrar aspectos ajenos al mismo. El resultado esperado es una formulación de concreto reproducible que sirva como base para su posterior estandarización en la planta.

II. Contextualización de problema.

El presente estudio se desarrolla en la planta de POSTENIC S.A., una empresa nicaragüense dedicada a la fabricación de postes de concreto pretensados centrifugados. La planta se encuentra ubicada en la comunidad de Veracruz, dentro del municipio de Nindirí, departamento de Masaya, Nicaragua. Esta zona del país se caracteriza por su cercanía a la capital, Managua, y por ser un punto estratégico para la distribución de productos de infraestructura eléctrica hacia diferentes regiones del territorio nacional.

POSTENIC S.A. es una de las dos plantas existentes en Nicaragua dedicadas exclusivamente a la producción de postes de concreto pretensados centrifugados. Su producción está destinada a satisfacer las demandas de las empresas distribuidoras de electricidad, tanto públicas como privadas, que operan en el país, incluyendo a DISNORTE y DISSUR, las cuales suministran energía eléctrica a los hogares, comercios e industrias de Nicaragua.

Los productos fabricados por la planta son postes de concreto de diferentes alturas y capacidades de carga, que van desde los 30 pies hasta los 46 pies, con capacidades horizontales que oscilan entre 300 y 800 decanewtons. Estos postes son elementos estructurales sometidos a esfuerzos de flexión, compresión y torsión, y deben cumplir con requisitos estrictos de resistencia, durabilidad y seguridad, ya que su función es soportar el tendido eléctrico en condiciones climáticas adversas y a lo largo de muchos años de servicio.

El proceso productivo de POSTENIC S.A. se caracteriza por la fabricación de postes mediante el método de centrifugado, lo que implica que el concreto debe tener características particulares de trabajabilidad, cohesión y resistencia para garantizar que durante el centrifugado se logre una compactación adecuada y que el poste final tenga la densidad y resistencia requeridas. Este proceso exige que el concreto utilizado cumpla con parámetros muy específicos, tanto en estado fresco como endurecido.

El personal de la planta está compuesto por un equipo de producción experimentado, que incluye operarios, técnicos y personal de supervisión, quienes conocen bien las particularidades del proceso de centrifugado. Sin embargo, hasta antes de este estudio, la planta no contaba con un diseño formal de mezcla de concreto con memoria de cálculo. La dosificación que se utilizaba era empírica, sin un sustento técnico documentado que permitiera su ajuste ante cambios en las condiciones de los materiales o ante requerimientos específicos de los clientes.

La empresa cuenta con una certificación ISO 9001, lo que implica que debe mantener procedimientos documentados y trazables en sus procesos productivos. Un diseño de concreto fundamentado técnicamente contribuye directamente a cumplir con los requisitos de esta certificación, ya que permite estandarizar la producción y tener un control documentado de las proporciones de los materiales utilizados.

El presente estudio se inscribe en un contexto de mejora continua dentro de la planta, con el objetivo de fortalecer la calidad del producto final y optimizar el uso de los recursos disponibles.

III. Planteamiento del problema.

En la planta de postes de concreto pretensados centrifugados (POSTENIC) donde se desarrolla el presente estudio requiere un proporcionamiento de mezcla que será utilizado en la fabricación de postes desde 30ft, 35ft, 40ft, 46ft con capacidades de carga horizontales que van desde 300 daN, 500 daN, y 800 daN.

Este requerimiento va ligado con la ausencia del proporcionamiento de materiales para elaborar el concreto. El problema identificado consiste en la falta de una dosificación que funcione como estandarización para mejorar la eficiencia y calidad del proceso de producción.

IV. Justificación del estudio.

El concreto constituye el núcleo fundamental de los postes pretensados centrifugados, por lo que su correcta dosificación y comportamiento determinan en gran medida la calidad, durabilidad y competitividad del producto final. Este estudio se realiza por que la planta no cuenta con una dosificación fija, dado que no se brindó un documento técnico que justifique las proporciones. Esta carencia genera incertidumbre sobre las propiedades reales del concreto, tanto en estado fresco como endurecido, y limita la capacidad de realizar ajustes sistemáticos ante variaciones en las características de los materiales, como cambios en la humedad o en la granulometría de los agregados.

La ausencia de un diseño formal se traduce en dificultades prácticas concretas: variaciones en el revenimiento, excesos o defectos de lechada, y problemas durante los procesos de consolidación, traslado, desmolde y curado con vapor. Estos factores afectan la estabilidad del proceso productivo y pueden comprometer la calidad del poste terminado. Por ello, resulta indispensable contar con un diseño de concreto técnicamente fundamentado que permita controlar la producción, proyectar con precisión el consumo de materiales y reducir la variabilidad en las propiedades del concreto.

Además, la empresa cuenta con una certificación ISO 9001 que exige procedimientos documentados y trazables. El diseño de concreto que se propone debe alinearse con los requisitos establecidos en la Especificación Técnica de DISNORTE-DISSUR (2015) para postes de hormigón pretensado centrifugado o vibrado, así como con los lineamientos de la Guía Concrete Poles Design (ASCE CPD, 1987) y las normativas ACI 211 y ACI 318. Un diseño fundamentado en estas referencias normativas contribuirá a que la planta cumpla con los estándares de calidad exigidos y a que sus productos sean más competitivos en el mercado nacional.

Este estudio se realiza para desarrollar un proporcionamiento de mezcla de concreto con respaldo técnico, que funcione como base documentada para la producción de postes en la planta. Una vez completado, el diseño permite realizar correcciones sistemáticas y 0a
utomáticas ante variaciones en las propiedades de los agregados, como cambios en la humedad o en la granulometría, lo que antes no era posible por la ausencia de una memoria de cálculo.
El diseño facilitará además la optimización del consumo de cemento, que es uno de los insumos de mayor incidencia económica en la fabricación de los postes.

Los productos concretos que entregará este trabajo al finalizar son: una memoria de cálculo completa que sustente la dosificación propuesta, una hoja de cálculo (Excel) que permita realizar correcciones por humedad de manera ágil, y una dosificación documentada que pueda ser utilizada directamente por el personal de producción y calidad. Estas herramientas prácticas dinamizarán el proceso productivo al proporcionar una guía clara y reproducible.

Los destinatarios directos de este estudio son la empresa Postes de Concretos de Nicaragua S.A., que dispondrá de un control de calidad más riguroso y de una herramienta para proyectar sus consumos con mayor precisión; el personal de producción y calidad, que contará con procedimientos más ágiles y estandarizados; y la universidad, que fortalece su vínculo con el sector productivo y forma profesionales en un campo tan vasto y especializado como la tecnología del concreto, donde existe una limitada oferta de ingenieros con formación específica en diseño y control de calidad.

Más allá de la planta, este estudio tiene una proyección relevante para la industria de prefabricados de concreto en Nicaragua. Aunque en el país solo existen dos plantas dedicadas a la fabricación de postes de concreto, contar con un diseño técnicamente fundamentado y alineado con normativas internacionales (DISNORTE-DISSUR, ASCE, ACI) reforzará la calidad del producto, lo que se traduce en postes más versátiles, estables y competitivos.

El estudio demuestra también que, con los conocimientos y recursos disponibles en el entorno local, es posible generar soluciones técnicas que mejoren la eficiencia y la calidad de los procesos productivos.

El estudio es viable y pertinente de realizar en este momento, pues se cuenta con la información necesaria, los espacios físicos y los materiales disponibles en la planta para llevar a cabo los ensayos y el diseño propuesto. Además, el equipo investigador tiene acceso a las normativas de referencia y al conocimiento técnico requerido para desarrollar el diseño con fundamento sólido.

V. Objetivos.

V.1 Objetivo General.

Establecer las bases técnicas para la dosificación de concreto destinada a la fabricación de postes pretensados centrifugados en POSTENIC S.A., mediante la aplicación del método ACI 211, considerando que la planta no cuenta con registros históricos de resistencia que permitan un control estadístico.

V.2 Objetivos Específicos.

5.2.1 Caracterizar los materiales disponibles en la planta.

5.2.2 Determinar los parámetros de diseño de la mezcla de concreto, estableciendo así los criterios técnicos que guiarán la dosificación para los diferentes tipos de postes fabricados en la planta.

5.2.3 Proponer una dosificación de concreto con fundamento técnico que cumpla con los requerimientos establecidos en las normativas ASCE CPD 1987, DISNORTE-DISSUR 2015 y ACI 318-19.

VI. Hipótesis de investigación.

El diseño de una mezcla de concreto para postes pretensados centrifugados, mediante el método ACI 211 y aplicando el factor de seguridad correspondiente, permitirá establecer una dosificación técnicamente fundamentada que cumpla con las normas aplicables (ASCE CPD, DISNORTE-DISSUR, ACI 318), garantizando propiedades consistentes y optimizando el consumo de cemento.

VII. Alcances y Limitaciones.

VII.1 Alcance del estudio

El presente estudio se centra en el diseño de una dosificación de concreto para la planta de Postes de Concretos de Nicaragua S.A., ubicada en la comunidad de Veracruz, municipio de Nindirí, departamento de Masaya, Nicaragua. El estudio parte de cero, sin utilizar datos históricos de la empresa, y se fundamenta en la caracterización de los materiales disponibles y en la aplicación del método ACI 211.

Las variables principales a estudiar son la dosificación de concreto, la resistencia a compresión, la trabajabilidad y el rendimiento general de la mezcla. Para medir estas variables se utilizarán indicadores como la resistencia a compresión expresada en psi, el revenimiento en pulgadas y las proporciones de los materiales en kilogramos por metro cúbico de concreto. El diseño se enfoca en el rendimiento mecánico del concreto (resistencia), por lo que la relación agua/cemento se definirá en función de la resistencia requerida y no por criterios de durabilidad por exposición.

El estudio contempla la elaboración de una muestra de concreto, de la cual se extraerán 6 cilindros de dimensiones 4 por 8 pulgadas, distribuidos de la siguiente manera: 2 cilindros serán ensayados a los 3 días, 2 a los 7 días, y los 2 restantes a los 28 días, con el fin de obtener la curva de resistencia del concreto diseñado.

La fase experimental se desarrolla durante el período de elaboración del presente estudio. Los datos serán obtenidos a través de un laboratorio ajeno a la empresa, garantizando la independencia y objetividad de los resultados. El diseño se enfoca en el rendimiento mecánico del concreto, con un revenimiento de 1 a 2 pulgadas, sin abordar criterios de durabilidad por exposición.

VII.2 Limitaciones del estudio.

El estudio excluye los cálculos estructurales de los postes, así como los aspectos administrativos relacionados con la gestión de la producción. No se realiza una comparación con dosificaciones anteriores, ya que el propósito del estudio es establecer un nuevo diseño de mezcla con fundamento técnico, partiendo de cero y sin utilizar datos históricos de la empresa.

En cuanto al control estadístico avanzado basado en la normativa ACI 214, se reconoce que su aplicación rigurosa requiere una cantidad de datos que podría no alcanzarse en este estudio, por lo que el diseño se basa en el factor de seguridad establecido en la Tabla 9-11 de la ACI 211. Esta limitación es producto de la ausencia de datos históricos de resistencia en la planta, pero también está condicionada por los costos asociados a la implementación de un programa de control estadístico: la ejecución de al menos 30 ensayos de compresión para calcular la desviación estándar real de la producción representa una inversión significativa en tiempo, materiales y ensayos de laboratorio, lo cual no era viable dentro del presupuesto y el cronograma del presente estudio.

De igual manera, el estudio no incluye ensayos de durabilidad del concreto (permeabilidad, resistividad eléctrica, resistencia a la corrosión, entre otros), a pesar de ser relevantes para garantizar la vida útil de los postes en condiciones ambientales adversas como las zonas costeras. Esta decisión responde a que dichos ensayos requieren de equipos especializados y protocolos de laboratorio que implican costos elevados, los cuales exceden los recursos disponibles para el equipo investigador. En el contexto nacional, la realización de un ensayo de permeabilidad según la norma ASTM C1202, por ejemplo, puede tener un costo aproximado de 200 a 400 dólares por espécimen, lo que hace inviable su inclusión en un estudio con presupuesto limitado.

Además, el estudio se basó en una única tanda de concreto de 0.41 m³, equivalente al volumen de un poste de 40 pies. Esta decisión, aunque operativamente práctica y económicamente viable, limita la capacidad de evaluar la reproducibilidad del diseño ante variaciones en los materiales o en las condiciones de producción. La elaboración de múltiples tandas de prueba implicaría costos adicionales en materiales, mano de obra y ensayos de laboratorio que no estaban contemplados en los recursos del estudio. Por lo tanto, los resultados obtenidos deben interpretarse como válidos para las condiciones específicas en las que se realizaron, y se recomienda que futuras investigaciones amplíen la muestra para confirmar la reproducibilidad del diseño.

El diseño de la investigación es de tipo experimental, pues se formula una dosificación, se elabora el concreto y se ensayan los especímenes para verificar su comportamiento. Sin embargo, el enfoque en la resistencia a compresión, aunque adecuado para el diseño estructural, deja sin evaluar otros aspectos importantes como la durabilidad, la permeabilidad o la resistencia a la corrosión. Esta limitación está directamente relacionada con los costos y la disponibilidad de equipos de laboratorio en el entorno local.

Respecto a la generalización de los resultados, se desconoce si estos son aplicables a otras plantas, dado que cada planta tiene una naturaleza distinta de trabajo, por lo que los hallazgos se circunscriben al contexto específico de Postes de Concretos de Nicaragua S.A. y a los materiales disponibles en ella. La caracterización de materiales y la dosificación obtenida son específicas para los agregados del flujo del volcán Masaya y para el cemento tipo HE Holcim; cualquier cambio en estos insumos requeriría una nueva caracterización y ajuste de la dosificación, lo que también implicaría costos adicionales para la empresa.

Finalmente, se reconoce que el diseño propuesto requerirá ajustes en el futuro, aunque ese no es el núcleo del estudio sino más bien un beneficio derivado del mismo. La recopilación sistemática de datos de resistencia y la eventual aplicación de la normativa ACI 214 permitirán reducir el factor de seguridad y optimizar el consumo de cemento, pero este proceso requerirá inversión en tiempo, ensayos y personal calificado, lo que representa una limitación operativa y económica que la planta deberá considerar para su implementación a largo plazo.

VIII. Marco Teórico

El marco teórico del presente estudio constituye el sustento conceptual y científico sobre el cual se fundamenta todo el trabajo de diseño de mezcla de concreto para postes pretensados centrifugados. Este apartado se organiza en cinco secciones: Estado del arte, Bases teóricas, Revisión de literatura previa, Variables e Indicadores asociados a cada variable. En su conjunto, estas secciones proporcionan al lector los elementos necesarios para comprender los principios que guiaron el diseño, las normativas aplicadas, los materiales caracterizados y el método de verificación experimental.

VIII.1 Antecedentes del estudio

Previo al desarrollo del presente estudio, la planta de POSTENIC S.A. operaba con una formulación de concreto que había sido establecida en administraciones anteriores, sin que existiera un registro documentado del procedimiento mediante el cual fue obtenida. Esta formulación, aunque funcional desde el punto de vista operativo, carecía de una memoria de cálculo que justificara técnicamente las proporciones utilizadas, lo que limitaba la capacidad de realizar ajustes sistemáticos ante cambios en las propiedades de los materiales, como variaciones en la humedad o en la granulometría de los agregados.

El equipo investigador, al iniciar su trabajo en la planta, tuvo conocimiento de que los ensayos realizados sobre el concreto producido con dicha formulación arrojaban valores de resistencia que oscilaban entre 8500 y 9500 psi, significativamente por encima de lo que los requerimientos técnicos del producto podrían justificar. Este dato resultó relevante porque, aunque una mayor resistencia puede parecer beneficiosa, también implica un consumo elevado de cemento, que es el insumo de mayor incidencia económica en la fabricación de postes, lo que se traduce en costos más altos sin una necesidad estructural real.

En una ocasión anterior al presente estudio, la empresa contrató los servicios de un laboratorio externo para evaluar la mezcla de concreto utilizada. Los resultados de dicho análisis arrojaron una dosificación con un contenido de cemento aún mayor al que se estaba utilizando, y con una resistencia inferior a la que se obtenía con la formulación empírica. Desde el punto de vista técnico y económico, este resultado resultó inconsistente, lo que evidenció la necesidad de abordar el diseño de mezcla desde una perspectiva fundamentada.

A lo largo de la experiencia laboral en la planta, el equipo investigador ha tenido la oportunidad de observar directamente el comportamiento del concreto en el proceso productivo, lo que ha permitido identificar áreas de mejora, principalmente en lo que respecta a la consistencia de la mezcla y a la posibilidad de estandarizar el proceso de dosificación. Estos antecedentes, sumados al interés personal por la tecnología del concreto, motivaron la realización del presente estudio, que plantea un diseño de mezcla desde cero, con fundamento técnico y con aplicación de criterios actualizados.

Cabe señalar que, debido a políticas internas de la empresa, no ha sido posible acceder a datos históricos de resistencia ni a registros documentados de las dosificaciones utilizadas anteriormente. Por esta razón, el presente estudio parte de cero, sin utilizar información confidencial de la compañía, y se fundamenta exclusivamente en la caracterización de los materiales disponibles y en la aplicación de metodologías reconocidas internacionalmente.

En ese contexto, el diseño de mezcla propuesto no solo responde a la necesidad de contar con un documento técnico que sustente la producción, sino también a la oportunidad de establecer una base para la mejora continua del proceso y, eventualmente, para la optimización del consumo de cemento, lo que representa un beneficio potencial tanto técnico como económico para la planta.

VIII.2 Marco Contextual

Ubicación geográfica

El presente estudio se desarrolla en la planta de POSTENIC S.A. (Postes de Concretos de Nicaragua, Sociedad Anónima), una empresa nicaragüense dedicada a la fabricación de postes de concreto pretensados centrifugados. La planta se encuentra ubicada en la comunidad de Veracruz, dentro del municipio de Nindirí, departamento de Masaya, Nicaragua.

Esta zona del país se caracteriza por su cercanía a la capital, Managua (aproximadamente a 25 kilómetros), y por ser un punto estratégico para la distribución de productos de infraestructura eléctrica hacia diferentes regiones del territorio nacional. El departamento de Masaya es conocido por su actividad industrial y comercial, así como por su cercanía a fuentes de materiales de construcción, como los agregados pétreos provenientes del flujo del volcán Masaya, que son utilizados en la fabricación de concreto.

La ubicación de la planta en esta región facilita el acceso a los materiales necesarios para la producción, así como la distribución de los productos terminados hacia los principales centros de consumo del país.

Descripción de la empresa y su actividad productiva

POSTENIC S.A. es una de las dos plantas existentes en Nicaragua dedicadas exclusivamente a la producción de postes de concreto pretensados centrifugados. Su producción está destinada a satisfacer las demandas de las empresas distribuidoras de electricidad, tanto públicas como privadas, que operan en el país, incluyendo a DISNORTE (Distribuidora Nicaragüense de Electricidad, Empresa de Transmisión) y DISSUR (Distribuidora Nicaragüense de Electricidad, Empresa de Distribución), las cuales suministran energía eléctrica a los hogares, comercios e industrias de Nicaragua.

Los productos fabricados por la planta son postes de concreto de diferentes alturas y capacidades de carga, que van desde los 30 pies hasta los 46 pies, con capacidades horizontales que oscilan entre 300 y 800 decanewtons (daN). Estos postes son elementos estructurales sometidos a esfuerzos de flexión, compresión y torsión, y deben cumplir con requisitos estrictos de resistencia, durabilidad y seguridad, ya que su función es soportar el tendido eléctrico en condiciones climáticas adversas y a lo largo de muchos años de servicio.

La empresa cuenta con una certificación ISO 9001, lo que implica que debe mantener procedimientos documentados y trazables en sus procesos productivos. Un diseño de concreto fundamentado técnicamente contribuye directamente a cumplir con los requisitos de esta certificación, ya que permite estandarizar la producción y tener un control documentado de las proporciones de los materiales utilizados.

Proceso productivo y características técnicas

El proceso productivo de POSTENIC S.A. se caracteriza por la fabricación de postes mediante el método de centrifugado, lo que implica que el concreto debe tener características particulares de trabajabilidad, cohesión y resistencia para garantizar que durante el centrifugado se logre una compactación adecuada y que el poste final tenga la densidad y resistencia requeridas.

El proceso de centrifugado consiste en colocar el concreto fresco en un molde cilíndrico que es sometido a rotación a alta velocidad. Esta fuerza centrífuga compacta el concreto contra las paredes del molde, eliminando el exceso de agua y aire, y creando una estructura densa y uniforme. Este proceso exige que el concreto utilizado cumpla con parámetros muy específicos, tanto en estado fresco (revenimiento controlado, cohesión adecuada) como endurecido (alta resistencia, durabilidad).

El personal de la planta está compuesto por un equipo de producción experimentado, que incluye operarios, técnicos y personal de supervisión, quienes conocen bien las particularidades del proceso de centrifugado. Sin embargo, hasta antes de este estudio, la planta no contaba con un diseño formal de mezcla de concreto con memoria de cálculo. La dosificación que se utilizaba era empírica, sin un sustento técnico documentado que permitiera su ajuste ante cambios en las condiciones de los materiales o ante requerimientos específicos de los clientes.

Mercado y clientes

Los postes fabricados por POSTENIC S.A. son utilizados en proyectos de electrificación rural y urbana, así como en el mantenimiento y expansión de las redes de distribución eléctrica del país. Los principales clientes son las empresas distribuidoras de electricidad (DISNORTE y DISSUR), así como contratistas privados que realizan obras de infraestructura eléctrica para el sector público y privado.

La demanda de postes de concreto en Nicaragua está directamente relacionada con el desarrollo de la infraestructura eléctrica del país, que ha experimentado un crecimiento significativo en las últimas décadas. Este crecimiento ha generado una demanda constante de postes de concreto de diferentes características, lo que hace indispensable que la planta cuente con procesos productivos eficientes y controlados.

Contexto normativo y regulatorio

La producción de postes de concreto en Nicaragua está regulada por diversas normativas técnicas que establecen los requisitos de calidad, resistencia y durabilidad que deben cumplir estos productos. Entre las principales normativas aplicables se encuentran:

Especificación Técnica de DISNORTE-DISSUR (2015): Establece los requisitos para postes de hormigón pretensado centrifugado o vibrado que se instalan en las redes de distribución eléctrica de Nicaragua. Esta especificación exige que los postes cumplan con parámetros específicos de resistencia, durabilidad y trazabilidad.

Norma Nicaragüense de la Construcción (NIC-2019): Establece los criterios generales para el diseño y construcción de estructuras de concreto en el país, incluyendo los requisitos para los materiales constituyentes y los procedimientos de control de calidad.

Normas ASTM International: Establecen los métodos de ensayo para la caracterización de materiales (C136, C127, C128, C566) y para la evaluación del concreto endurecido (C39, C143, C31).

Normas ACI (American Concrete Institute): Proporcionan los métodos de diseño de mezclas (ACI 211), los criterios estructurales para elementos de concreto (ACI 318), y las guías para la evaluación estadística de resultados de resistencia (ACI 214).
Certificación ISO 9001: La empresa cuenta con esta certificación, que exige procedimientos documentados y trazables en sus procesos productivos.

Situación problemática

A pesar de contar con un equipo experimentado y con la certificación ISO 9001, la planta de POSTENIC S.A. no contaba, hasta antes de este estudio, con un diseño de mezcla de concreto documentado y fundamentado técnicamente. La dosificación que se utilizaba era empírica, basada en una receta heredada de administraciones anteriores, sin memoria de cálculo que justificara las proporciones utilizadas.

Esta situación generaba incertidumbre sobre las propiedades reales del concreto (resistencia, trabajabilidad, durabilidad) y limitaba la capacidad de la planta para realizar ajustes sistemáticos ante variaciones en las propiedades de los materiales, como cambios en la humedad o en la granulometría de los agregados. Además, la ausencia de un diseño formal dificultaba el cumplimiento de los requisitos de la certificación ISO 9001, que exige procedimientos documentados y trazables.

Importancia del estudio para el contexto local

El presente estudio se inscribe en un contexto de mejora continua dentro de la planta, con el objetivo de fortalecer la calidad del producto final y optimizar el uso de los recursos disponibles. La producción de postes de concreto es una actividad estratégica para el desarrollo de la infraestructura eléctrica del país, por lo que garantizar que los postes tengan una calidad consistente y confiable tiene implicaciones directas en la seguridad y continuidad del servicio eléctrico en Nicaragua.

Además, el estudio demuestra que, con los conocimientos y recursos disponibles en el entorno local, es posible generar soluciones técnicas que mejoren la eficiencia y la calidad de los procesos productivos, contribuyendo así al desarrollo de la industria nacional de prefabricados de concreto.

VIII.3 Estado del arte

El diseño de mezclas de concreto ha sido ampliamente estudiado en la literatura técnica internacional durante las últimas décadas, con especial énfasis en concretos de alta resistencia para elementos estructurales sometidos a cargas elevadas. Autores de referencia como Neville (2011) y Kosmatka y Wilson (2011) han establecido las bases teóricas fundamentales sobre las propiedades del concreto, tanto en estado fresco como endurecido, y han sistematizado los métodos de dosificación más utilizados en la práctica ingenieril.

En el ámbito normativo internacional, el Comité ACI 211 ha desarrollado el método de selección de proporciones para concretos de densidad normal y alta, ampliamente utilizado en Latinoamérica y en Nicaragua. Dicho método, conocido como ACI 211, proporciona un procedimiento sistemático para determinar las cantidades de cemento, agua, agregados y aire necesarias para alcanzar una resistencia y trabajabilidad determinadas, partiendo de las propiedades de los materiales disponibles. Este método es especialmente útil cuando no se dispone de datos estadísticos previos de resistencia, ya que incorpora factores de seguridad que permiten diseñar con un margen conservador, como se ha aplicado en el presente estudio mediante la Tabla 9-11.

Por su parte, la American Society of Civil Engineers (ASCE) ha publicado guías específicas para el diseño y uso de postes de concreto, conocidas como Concrete Pole Design (CPD, 1987). En dicho documento se definen los requerimientos mínimos de resistencia y durabilidad para estos elementos estructurales, estableciendo que la resistencia especificada no debe ser menor de 5000 psi y que preferiblemente debe alcanzar los 7000 psi o más. Este criterio fue adoptado como referencia en el presente estudio, aunque se optó por un diseño de 6000 psi por considerar que satisface plenamente los requisitos estructurales de los postes fabricados en la planta, con capacidades de carga de hasta 800 daN.

En el contexto nacional, la Especificación Técnica de DISNORTE-DISSUR (2015) regula los requisitos para postes de hormigón pretensado centrifugado o vibrado que se instalan en las redes de distribución eléctrica de Nicaragua. Este documento técnico exige que los postes cumplan con parámetros específicos de resistencia, durabilidad y trazabilidad, lo que hace indispensable contar con un diseño de concreto documentado y sustentado en normas reconocidas. La normativa nacional también hace referencia a la Norma Nicaragüense de la Construcción NIC-2019, que establece los criterios generales para el diseño y construcción de estructuras de concreto en el país.

Si bien existen numerosos estudios sobre dosificación de concreto a nivel internacional, se ha identificado un vacío en investigaciones aplicadas específicamente a postes pretensados centrifugados en el contexto centroamericano y, particularmente, en Nicaragua. La mayoría de los estudios disponibles se centran en concretos para elementos estructurales convencionales (vigas, columnas, losas) y no abordan las particularidades del proceso de centrifugado, que exige una mezcla con características especiales de trabajabilidad y cohesión. Esta situación constituye una oportunidad para el presente estudio, que busca generar conocimiento aplicado y útil para la industria nacional de prefabricados de concreto.

La American Society of Civil Engineers (ASCE) ha publicado guías específicas para el diseño y uso de postes de concreto (CPD, 1987), definiendo requerimientos de resistencia y durabilidad para estos elementos. En el contexto nacional, la Especificación Técnica de DISNORTE-DISSUR (2015) regula los requisitos para postes de hormigón pretensado centrifugado o vibrado. Si bien existen numerosos estudios sobre dosificación de concreto, se ha identificado un vacío en investigaciones aplicadas específicamente a postes centrifugados en el contexto centroamericano, lo que constituye una oportunidad para el presente estudio.

VIII.4 Bases teóricas

La perspectiva teórica asumida en el presente estudio se fundamenta en la integración de principios científicos provenientes de la física, la química y la hidráulica de materiales, así como en la aplicación de normativas técnicas reconocidas internacionalmente. Esta integración permite abordar el diseño de mezclas de concreto desde una visión holística, en la que cada decisión de dosificación está respaldada tanto por fundamentos teóricos como por criterios normativos.

En el plano físico, la resistencia de materiales y la mecánica del pretensado son los pilares que sustentan el comportamiento estructural de los postes de concreto. El proceso de centrifugado, característico de la planta POSTENIC S.A., genera una compactación diferencial del concreto, aumentando su densidad en la periferia del elemento y reduciéndola en el núcleo, lo que confiere al poste una mayor resistencia a la flexión y a la compresión. Según Chiachío Ruano (2019), el pretensado permite distribuir uniformemente las tensiones a lo largo del elemento y reducir la fisuración bajo cargas de servicio, lo que es fundamental para elementos sometidos a esfuerzos de flexión como los postes de alumbrado y distribución eléctrica. La resistencia a compresión del concreto, medida en psi o kg/cm², es la propiedad que garantiza que el poste pueda soportar las cargas verticales y horizontales a las que estará sometido durante su vida útil.

En el plano químico, la hidratación del cemento Portland es el proceso mediante el cual el cemento reacciona con el agua para formar compuestos que le confieren resistencia y durabilidad al concreto. Neville (2011) explica que la hidratación del cemento es una reacción exotérmica que se desarrolla en varias etapas, generando productos como el silicato de calcio hidratado (C-S-H) y el hidróxido de calcio, que son los responsables de la cohesión y resistencia del material.

En el presente estudio se utilizó cemento tipo HE (alta resistencia inicial), el cual se caracteriza por un fraguado más rápido y un desarrollo temprano de resistencias superiores al cemento tipo I. Esta característica es especialmente ventajosa para la planta, ya que permite desmoldar los postes en menor tiempo y acelerar el ciclo de producción. El cemento tipo HE Holcim, con una gravedad específica de 3.15, fue caracterizado según las normas NTON 12006-11 y ASTM C1157, verificando su cumplimiento con los estándares de calidad exigidos para concretos de alta resistencia.

En el plano hidráulico, la relación agua/cemento (a/c) es el factor más influyente en la resistencia del concreto. La ley de Abrams, formulada por Duff Abrams en 1918, establece que la resistencia del concreto es inversamente proporcional a la relación agua/cemento: a menor relación a/c, mayor resistencia, siempre que la mezcla sea trabajable. Esta relación es el principio fundamental que sustenta el método de dosificación ACI 211, ya que a partir de la resistencia deseada se determina la relación a/c necesaria, y a partir de esta se calculan las cantidades de agua y cemento. En el presente estudio se determinó una relación agua/cemento de 0.43, que permite alcanzar la resistencia especificada de 6000 psi sin comprometer la trabajabilidad necesaria para el centrifugado. Este valor se encuentra dentro del rango recomendado por la ACI 211 para concretos de alta resistencia, y es consistente con los valores reportados en la literatura para elementos pretensados (Kosmatka y Wilson, 2011).

En el plano normativo, el diseño se fundamenta en tres pilares principales: el método de dosificación ACI 211, que proporciona el procedimiento sistemático para seleccionar proporciones; la normativa ASCE (CPD, 1987), que define los requerimientos de resistencia especificada para postes de concreto; y la normativa ACI 318-19, que establece los criterios para concreto estructural aplicables a elementos pretensados y postensados. Estas teorías han sido seleccionadas por ser las más utilizadas y reconocidas en Latinoamérica, y porque proporcionan un marco metodológico coherente con el enfoque del estudio, que parte de la ausencia de registros históricos de resistencia en la planta.

En el plano de la durabilidad, la permeabilidad del concreto es un factor determinante para la vida útil de los postes, especialmente en ambientes húmedos o costeros donde la corrosión de las armaduras es una amenaza constante. Neville (2011) señala que concretos con baja relación agua/cemento presentan una menor permeabilidad y, por lo tanto, una mayor capacidad para proteger las armaduras de presfuerzo frente a la corrosión. Aunque el presente estudio se enfocó principalmente en la resistencia a compresión, la relación a/c de 0.43 contribuye indirectamente a la durabilidad del poste al reducir la permeabilidad del concreto.

VIII.5 Revisión de literatura previa

La revisión de literatura previa se ha realizado mediante la consulta de fuentes bibliográficas especializadas en tecnología del concreto, con especial atención a aquellas que abordan el diseño de mezclas de alta resistencia, el comportamiento de elementos pretensados y las normativas aplicables en el contexto latinoamericano.

Las principales fuentes utilizadas son libros de texto reconocidos internacionalmente como "Propiedades del concreto" de Neville (2011), que constituye una obra de referencia obligada para cualquier estudio relacionado con la tecnología del concreto, y "Diseño y control de mezclas de concreto" de Kosmatka y Wilson (2011), que es el manual estándar utilizado por el Portland Cement Association para la formación de ingenieros y técnicos en el diseño de mezclas. Ambos textos han sido fundamentales para comprender los fundamentos teóricos de la dosificación y para aplicar correctamente el método ACI 211.

En cuanto a normativas técnicas, se han consultado los documentos del American Concrete Institute (ACI 211, ACI 318, ACI 214), que constituyen el marco regulatorio más utilizado para el diseño y control de calidad del concreto en América. La ACI 211 proporciona el método de dosificación, la ACI 318 establece los criterios estructurales para elementos de concreto, y la ACI 214 ofrece guías para la evaluación estadística de los resultados de resistencia. También se ha consultado la guía de la American Society of Civil Engineers para el diseño y uso de postes de concreto (ASCE CPD, 1987), que define los requerimientos específicos para estos elementos estructurales.

Además, se han revisado las normas ASTM International para métodos de ensayo de materiales (ASTM C39 para compresión, ASTM C143 para revenimiento, ASTM C136 para granulometría, ASTM C127 y C128 para gravedad específica y absorción, y ASTM C566 para humedad), así como la Especificación Técnica de DISNORTE-DISSUR (2015) y la Norma Nicaragüense de la Construcción NIC-2019, que regulan los requisitos para postes de concreto en el país.

La búsqueda se ha orientado a identificar metodologías de dosificación de concretos de alta resistencia, criterios para elementos pretensados y requerimientos de durabilidad. Se ha priorizado la selección de fuentes actualizadas y de alto reconocimiento académico, dando preferencia a aquellas que han sido validadas por la práctica ingenieril en Latinoamérica. El vacío identificado es la escasa aplicación de estos métodos a postes pretensados centrifugados en el contexto de Nicaragua, lo que justifica la pertinencia del presente estudio.

VIII.6 Variables.

Las variables del presente estudio se definen como características o cantidades que pueden medirse o cuantificarse, y que son objeto de análisis para verificar la hipótesis planteada. La correcta identificación y medición de las variables es esencial para garantizar la validez de los resultados obtenidos.

La variable independiente es la dosificación de concreto, entendida como las proporciones de cemento tipo HE, agregado fino (material cero 1/4"), agregado grueso (3/4") y agua de mezcla, expresada en kilogramos por metro cúbico (kg/m³). Esta variable es manipulada por el equipo investigador al formular la nueva dosificación, y sus valores se determinan a partir de la caracterización de los materiales y la aplicación del método ACI 211.

Las variables dependientes son tres, y su comportamiento está condicionado por la variable independiente. La primera es la resistencia a compresión (f□c), medida en psi mediante la prensa de compresión según la norma ASTM C39. La segunda es la trabajabilidad, medida a través del revenimiento (slump) en pulgadas mediante el cono de Abrams según la norma ASTM C143. La tercera es el rendimiento general del concreto, evaluado a través de la consistencia de los resultados y la capacidad de ajuste ante variaciones en los materiales, como la humedad de los agregados.

La medición de estas variables permite verificar si el diseño propuesto cumple con los requisitos de resistencia y trabajabilidad necesarios para la fabricación de postes pretensados centrifugados.

VIII.7 Los indicadores asociados a cada variable.

Variable: Dosificación (independiente) - Indicador: Proporciones de materiales - Unidad: kg/m³ - Instrumento: Hoja de cálculo / Memoria de cálculo

Variable: Resistencia (dependiente) - Indicador: Resistencia a compresión - Unidad: psi - Instrumento: Prensa de compresión (ASTM C39)

Variable: Trabajabilidad (dependiente) - Indicador: Revenimiento (slump) - Unidad: pulgadas - Instrumento: Cono de Abrams (ASTM C143)

Variable: Rendimiento (dependiente) - Indicador: Comportamiento del concreto - Unidad: Observable - Instrumento: Ensayo de cilindros

Estos indicadores permiten operacionalizar los conceptos abstractos en datos observables y medibles, facilitando la verificación de la hipótesis planteada.

VIII.8 Definiciones

1. **Poste de concreto pretensado centrifugado (spun-cast pole):** Elemento estructural fabricado mediante la colocación de concreto fresco en un molde que es sometido a rotación (centrifugado) para lograr su compactación y forma. (ACI 318-95)

2. **Poste de concreto estático (statically cast pole):** Elemento estructural fabricado mediante la colocación de concreto por gravedad y vibración en un molde, sin el uso de fuerza centrífuga. (ACI 318-95)

3. **Punta (tip):** Término sinónimo de "parte superior" cuando se refiere al extremo pequeño de un poste cónico. (ASTM A416)

4. **Base (butt):** Término sinónimo de "base" cuando se refiere al extremo grande de un poste cónico. (ASTM A416)

5. **Cono (taper):** Medida que describe el cambio en el diámetro de una sección por unidad de longitud. (ASTM A416), (ACI 318-95)

6. **Estructura en voladizo (cantilevered structure):** Estructura que se asume fija en un extremo y libre para trasladarse y rotar en el otro extremo. (ACI 318-95)

7. **Resistencia especificada a compresión (f'c):** Resistencia a compresión del concreto a los 28 días, utilizada como criterio de diseño, que para postes no debe ser inferior a 6000 PSI. (Lakelandgoc.net)

8. **Resistencia de agrietamiento (first crack):** Carga o momento en un poste en el que las fibras extremas del concreto ya no pueden contribuir a la resistencia a la tracción, apareciendo las primeras fisuras capilares. (ASTM A416), (ACI 318-95)

9. **Resistencia última (ultimate strength):** Carga de diseño máxima bajo la cual el poste puede ser usado sin falla, típicamente 1.5 veces la resistencia de agrietamiento. (ACI 318-95), (Lakelandgoc.net), (ASTM A416)

10. **Capacidad de momento último (ultimate moment capacity**): Resistencia de un miembro, también conocida como la resistencia nominal multiplicada por el factor de reducción de capacidad φ. (ACI 318-95)

11. **Cero tensión (zero tension):** Carga en la cual una grieta que se ha abierto previamente debido al exceso de esfuerzo de tracción se vuelve a abrir (también conocida como carga de descompresión o carga de agrietamiento repetido). (ACI 318-95)

12. **Momento de diseño (design bending moment):** Momento en varios puntos de una estructura generado por cargas mayoradas de diseño. (ACI 318-95),

13. **Momento P-delta:** Momento secundario creado por cargas verticales que actúan sobre la estructura deflectada. (ACI 318-95)

14. **Acero de presfuerzo (strand):** Acero utilizado para aplicar la fuerza de pretensado, típicamente de 7 alambres, que debe cumplir con la norma ASTM A416 Grado 270. (Lakelandgoc.net)

15. **Transferencia de presfuerzo:** Momento en el proceso de fabricación en el que la fuerza de pretensado se transfiere del equipo de tensado al concreto; la resistencia del concreto en este punto no debe ser inferior a 4000 PSI. (Lakelandgoc.net)

16. **Ensayo de compresión de cilindros de concreto:** Procedimiento estandarizado según ASTM C39 para determinar la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto. (ASTM A416)

17. **Ensayo horizontal de postes:** Procedimiento de prueba en el que se aplica una carga lateral al poste para verificar su capacidad de resistencia y deflexión, siguiendo los procedimientos descritos en la Guía para el Diseño de Postes de Concreto (ACSE/PCI) (ACI 318)

18. **Poste de distribución:** Estructura utilizada para distribuir electricidad de bajo voltaje (normalmente hasta 50 kV). (ACI 318-95)

19. **Poste de transmisión:** Estructura (monoposte o H-frame) utilizada para transmitir electricidad de alto voltaje (por encima de 50 kV). (ACI 318-95)

20. **Estructura de punto muerto (dead end structure):** Estructura de transmisión o distribución en la que los conductores son terminados; estas estructuras pueden ser arriostradas o no arriostradas. (ACI 318-95)

21. **Grietas circunferenciales:** Grietas que son paralelas a una sección transversal de un poste de concreto. (ACI 318-95)

22. **Grietas longitudinales:** Grietas en el concreto que son paralelas al eje longitudinal del poste. (ACI 318-95)

23. **Flecha (sweep):** Desviación de un poste respecto a la línea recta, medida como la distancia máxima desde una línea recta que une los extremos del poste hasta la superficie del mismo. (ACI 318-95)

24. **Refuerzo en espiral (spiral reinforcement):** Refuerzo de acero que envuelve el refuerzo longitudinal; en postes de concreto es usualmente continuo a lo largo de toda la longitud del poste. (ACI 318-95)

25. **Punto de fijación (point-of-fixity):** Punto en la base del poste donde se considera que el poste está empotrado, ubicado a una distancia de la base igual al 7% de la longitud del poste. (ACI 318)

26. **Carga de punta (tip load):** Carga aplicada en la punta del poste utilizada para determinar la capacidad de momento último a lo largo del poste. (ACI 318)

27. **Método de la resistencia última:** Método de diseño explicado en el código ACI 318, que utiliza factores de carga y resistencia para dimensionar los elementos estructurales. (ACI 318)

28. **Punto simple de izaje (single-point pick):** Proceso en el que un poste se suspende o levanta utilizando un solo punto de elevación, generalmente ubicado al 30% de la longitud total medido desde la punta para soportar el izado horizontal. (Lakelandgoc.net), (ACI 318-95)

29. **Puntos múltiples de izaje (multiple-point picks):** Proceso en el que un poste o estructura se suspende o levanta desde más de un punto. (ACI 318-95)

30. **Inclinación (rake):** Cantidad de desplazamiento horizontal de la punta del poste creado al instalar un poste inclinado fuera de plomo, utilizado para contrarrestar la deflexión esperada bajo condiciones de carga cotidianas. (ACI 318-95)

IX. Diseño Metodológico de la Investigación.

IX.1 Enfoque de la investigación.

La presente investigación es de enfoque cuantitativo y de tipo experimental. Es cuantitativa porque se basa en la medición numérica de variables como la resistencia a compresión (psi), el revenimiento (pulgadas) y las proporciones de los materiales (kg/m³), utilizando métodos estadísticos para el análisis de los datos. Es experimental porque implica la manipulación deliberada de la variable independiente (dosificación de concreto) para observar su efecto sobre las variables dependientes (resistencia, trabajabilidad y rendimiento), en condiciones controladas de laboratorio. Este enfoque permite establecer relaciones de causa y efecto entre las variaciones en la dosificación y el comportamiento del concreto.

La hipótesis planteada en el presente estudio es de tipo **causal o explicativa**, ya que establece una relación de causa y efecto entre la variable independiente, el diseño de mezcla de concreto elaborado con el método ACI 211 y el factor de seguridad de la Tabla 9-11 y las variables dependientes, que incluyen el cumplimiento de normativas técnicas, la consistencia de las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido, la capacidad de realizar correcciones sistemáticas por humedad, y la optimización del consumo de cemento. Asimismo, es una hipótesis **direccional**, pues especifica el sentido esperado de la relación: se espera que el diseño propuesto permita alcanzar los efectos mencionados. Por su alcance, se clasifica como **compleja**, dado que involucra múltiples variables dependientes verificables mediante ensayos de laboratorio estandarizados (ASTM C39, ASTM C143) y mediciones numéricas objetivas (resistencias en psi, revenimiento en pulgadas, proporciones en kg/m³). Finalmente, es una hipótesis **empírica**, ya que su validación se fundamenta en datos obtenidos experimentalmente y no en apreciaciones subjetivas.

IX.2 Diseño de investigación.

El estudio es de alcance explicativo, ya que busca establecer relaciones de causa y efecto entre las variables de estudio, específicamente cómo las variaciones en la dosificación de concreto afectan la resistencia, la trabajabilidad y el rendimiento general de la mezcla. El diseño es experimental, pues se formula una dosificación, se elabora el concreto y se ensayan los especímenes para verificar su comportamiento, siguiendo un procedimiento controlado.

La investigación es de tipo aplicado, orientada a resolver un problema práctico en la planta (ausencia de un diseño documentado), y se fundamenta en el método ACI 211, con el factor de seguridad establecido en la Tabla 9-11, dado que la planta no cuenta con registros históricos de resistencia.

El control de variables extrañas se garantiza mediante la caracterización previa de todos los materiales, la estandarización de los procedimientos de ensayo según normas ASTM (C39, C143, C136, C127, C128, C566, C31), la calibración de los equipos de medición y el curado controlado de los especímenes. Esto asegura que los resultados obtenidos sean atribuibles a la variable independiente (dosificación) y no a factores externos no controlados.

En cuanto a la validez externa, se reconoce que los resultados son específicos para los materiales y condiciones de POSTENIC S.A., por lo que su generalización a otras plantas o contextos debe hacerse con cautela, considerando las diferencias en los materiales y procesos productivos. Esta limitación es inherente a los diseños experimentales aplicados y no resta validez a los hallazgos del estudio, que son robustos para el contexto en el que se desarrollaron.

El diseño experimental adoptado es coherente con los objetivos planteados y con la hipótesis de investigación, ya que permite manipular la variable independiente (dosificación), medir sus efectos en las variables dependientes (resistencia, trabajabilidad, rendimiento) y verificar si los resultados obtenidos confirman o refutan la hipótesis planteada.

IX.3 Población y muestra.

Para el presente estudio, la población está constituida por la totalidad de los postes de concreto pretensados centrifugados fabricados en POSTENIC S.A. Esta población incluye todos los postes producidos en la planta, independientemente de sus dimensiones (30, 35, 40 y 46 pies), capacidades de carga (300, 500 y 800 daN) o condiciones de producción, siempre que sean fabricados con los materiales disponibles en la planta (cemento tipo HE, agregados del flujo del volcán Masaya, y agua potable de ENACAL).

La población de interés no se limita a los postes ya fabricados, sino que incluye también aquellos que potencialmente serán producidos con el diseño de mezcla propuesto, ya que el objetivo del estudio es establecer una dosificación que pueda ser utilizada en la producción futura de todos los tipos de postes. Esta definición de población es coherente con el enfoque aplicado del estudio, que busca generar un diseño reproducible y estandarizable para toda la producción de la planta.

La muestra consiste en una tanda de concreto de 0.41 m³, equivalente al volumen necesario para fabricar un poste de 40 pies (12.19 metros) de longitud.

Esta tanda de concreto se preparó siguiendo las proporciones determinadas por el método ACI 211, utilizando los materiales caracterizados previamente. De esta tanda se extrajeron cilindros de concreto de dimensiones 4 por 8 pulgadas (101.6 mm x 203.2 mm), que constituyen los especímenes de ensayo. En total, se extrajeron seis (6) cilindros, distribuidos de la siguiente manera:

- **2 cilindros** ensayados a los **3 días** de edad
- **2 cilindros** ensayados a los **7 días** de edad
- **2 cilindros** ensayados a los **28 días** de edad

Justificación del tamaño de la muestra

El tamaño de la muestra (una tanda de 0.41 m³) ha sido definido considerando múltiples factores técnicos y prácticos:

Volumen representativo: 0.41 m³ es el volumen necesario para fabricar un poste de 40 pies, que es uno de los productos más comunes y representativos de la planta. Esto permite evaluar el comportamiento del concreto en condiciones similares a las de producción real, sin necesidad de realizar escalas intermedias.

Cantidad de cilindros: La extracción de 6 cilindros (2 por edad) es adecuada para obtener una curva de resistencia (3, 7 y 28 días) con un número suficiente de datos para verificar la hipótesis. La cantidad de cilindros es consistente con las recomendaciones de la ASTM C31 para estudios de investigación.

Consideraciones económicas: La elaboración de una tanda de mayor tamaño implicaría costos adicionales en materiales, mano de obra y ensayos de laboratorio, que no estaban contemplados en los recursos disponibles para el estudio.

Relación entre la muestra y la población

La muestra seleccionada (tanda de 0.41 m^3 y 6 cilindros) es representativa de la población (todos los postes fabricados en la planta) en los siguientes aspectos:

- **Materiales:** Los materiales utilizados en la muestra (cemento tipo HE, agregados del volcán Masaya, agua de ENACAL) son los mismos que se utilizan en la producción diaria de la planta, lo que garantiza que los resultados obtenidos en la muestra sean aplicables a la producción futura.
- **Procedimientos:** Los procedimientos de elaboración, curado y ensayo de los cilindros se realizaron siguiendo las normas ASTM, que son las mismas que se utilizan para el control de calidad en la producción.
- **Condiciones de producción:** La tanda de concreto se elaboró en la planta, utilizando los mismos equipos y procedimientos que se utilizan en la producción diaria, lo que garantiza que las condiciones de la muestra sean similares a las de la producción real.

IX.4 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

La recolección de datos en el presente estudio se ha diseñado siguiendo un enfoque riguroso basado en la aplicación de técnicas estandarizadas y el uso de instrumentos calibrados, con el objetivo de garantizar la confiabilidad, objetividad y reproducibilidad de los resultados obtenidos. Todos los procedimientos se han realizado conforme a las normas ASTM (American Society for Testing and Materials), que son ampliamente reconocidas a nivel internacional como los estándares de referencia para el ensayo de materiales de construcción.

Los datos recolectados corresponden a tres categorías principales: (1) caracterización de los materiales constituyentes del concreto, (2) evaluación de las propiedades del concreto en estado fresco, y (3) evaluación de las propiedades del concreto en estado endurecido. A continuación, se describen en detalle las técnicas e instrumentos utilizados para cada una de estas categorías.

La recolección de datos se realizó mediante ensayos de laboratorio estandarizados, siguiendo las normas ASTM para garantizar la confiabilidad y reproducibilidad de los resultados. Los datos recolectados se dividen en tres categorías: caracterización de materiales, evaluación del concreto en estado fresco y evaluación del concreto en estado endurecido.

Caracterización de materiales

Los ensayos de caracterización se realizaron para determinar las propiedades físicas de los agregados, cemento y agua.

Granulometría (ASTM C136): Se determinó la distribución de tamaños de partículas de los agregados fino y grueso mediante tamizado. Para el agregado fino se obtuvo un módulo de fineza de 3.02.

Gravedad específica y absorción (ASTM C127 y C128): Se determinó la densidad de los agregados y su capacidad de absorción de agua. El agregado fino presentó una gravedad específica de 2.81 y absorción de 2.80%; el agregado grueso, 2.78 y 2.24%, respectivamente.

Humedad (ASTM C566): Se determinó el contenido de humedad natural de los agregados: 3.00% para el fino y 1.00% para el grueso.

Masa unitaria (ASTM C29): Se determinó el peso volumétrico del agregado grueso compactado, resultando en 1707 kg/m³.

Cemento y agua: El cemento tipo HE Holcim fue verificado según NTON 12006-11 y ASTM C1157; el agua potable de ENACAL según ASTM C94.

Concreto en estado fresco

Revenimiento (slump) (ASTM C143): Se midió la trabajabilidad del concreto fresco utilizando el cono de Abrams. El procedimiento consiste en llenar el molde cónico en tres capas, apisonando cada una 25 veces, y medir el asentamiento después de retirar el molde.

Instrumentos: Cono de Abrams, varilla de apisonado, plancha base y cinta métrica.

Resultado: El revenimiento se mantuvo entre 1 y 2 pulgadas, adecuado para el proceso de centrifugado.

Concreto en estado endurecido

Elaboración de cilindros (ASTM C31): Se elaboraron 6 cilindros de 4"×8" siguiendo el procedimiento estándar. Los cilindros se curaron en agua saturada de cal a 23±2°C hasta la edad de ensayo.

Compresión (ASTM C39): Se determinó la resistencia a compresión de los cilindros a los 3, 7 y 28 días utilizando una prensa hidráulica calibrada.



Instrumentos: Prensa hidráulica, calibrador, balanza.

Resultados: Promedio de 4,500 psi a 3 días, 5,675 psi a 7 días y 6,100 psi a 28 días.

Confiabilidad de los datos

La confiabilidad de los datos se garantiza mediante la calibración periódica de los equipos y el estricto cumplimiento de las normas ASTM, asegurando que los resultados sean objetivos y verificables. Todos los datos fueron registrados en hojas de cálculo y formatos estandarizados para su posterior análisis.

IX.5 Procedimientos

El trabajo de campo se desarrollará en 5 etapas secuenciales.

En la Etapa 1 (Preparación): se realiza la coordinación con la planta.

Se coordino una prueba, para una mejor confianza se preparó una dosificación para un poste de 30 ft, para evaluar su comportamiento.

En la Etapa 2 (Caracterización de materiales): se realizaron en un laboratorio externo, ensayos a los agregados que incluyen análisis granulométrico, determinación de humedad y masa unitaria.

- **Cemento Gris tipo HE Holcim**: cemento de alta resistencia con una gravedad especifica 3.15 y fraguado rápido, ideal para proyectos que requieren rapidez y durabilidad, destacando por su alta trabajabilidad y alta calidad para morteros, enchapes y estructuras, ya que su destacado desempeño cumple y excede los estándares de la Norma Técnica Obligatoria Nicaragüense NTON 12006-11 equivalente a la norma ASTM C 150 como cemento tipo 3. Así como los parámetros de la norma ASTM C 1157 para cementos tipo AR.

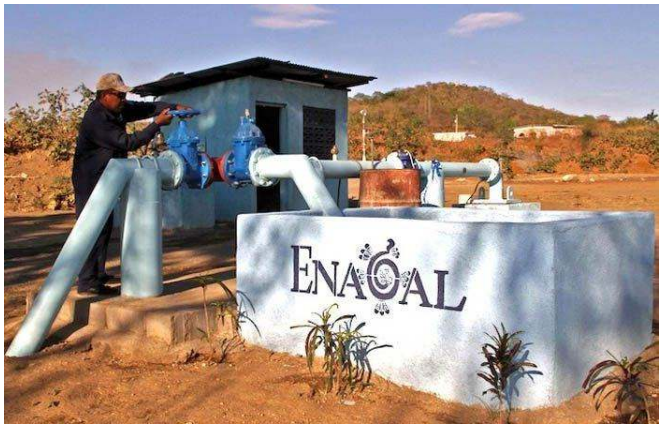


- **Agregado Fino y Grueso**: agregados de origen pétreo, son materiales granulares obtenidos a partir de la trituración o procesamiento natural de rocas extraídas del flujo del volcán Masaya, el agregado fino con una gravedad especifica de 2.81 es identificado como material cero 1/4” y el agregado grueso con una gravedad especifica de 2.78 utilizado para la elaboración de la mezcla de un tamaño máximo nominal (TMN) de 3/4". La granulometría de todos los materiales usados cumple con la norma ASTM C33, así como las especificaciones del cuadro 1003-3 del NIC-2019.





- **Agua:** ENACAL potable de conformidad a los criterios del ACI y con lo establecido por la normativa ASTM C94.



En la Etapa 3 (Dosificación y mezclado): se calcula la dosificación mediante el método ACI 211 con el factor de seguridad, y se prepara la tanda de prueba de 0.41 m³.

Condiciones y Especificaciones. Se requiere el concreto para un poste de concretos centrifugados. La resistencia a compresión especificada, de 422 kg/cm2 a los 28 días. El revenimiento (asentamiento) debe ser entre 25 mm y 50 mm. Se necesita un agregado de tamaño máximo nominal de 19 mm. **No hay datos estadísticos anteriores disponibles**.

Resistencia. La resistencia de diseño de 422 kg/cm^2. Como no hay datos estadísticos disponibles, (resistencia a compresión requerida para el proporcionamiento) de la Tabla 9-11 es igual a **1.10 f'c + 50** (kg/cm2), por lo tanto, F'_{Cr} = 1.10 (422) + 50 = 514.2 kg/cm2.

Relación Agua-Cemento, la relación agua-cemento máxima es de 0.43. La relación agua-cemento recomendada para la resistencia de 514.2 kg/cm2 es 0.43.

Contenido de Aire. 2.0% para el agregado de 19 mm. El contenido de aire de la mezcla de prueba debe estar entre ±0.5% del contenido máximo permitido.

Revenimiento (Asentamiento). El revenimiento especificado está entre 25 mm y 50 mm. Use 50 mm ± 20mm para el proporcionamiento.

Contenido de Agua. La Tabla 9-5 y la Figura 9-5 recomiendan que un concreto de 50 mm de revenimiento, con agregado de 19 mm, debería tener un con tenido de agua de 190 kg/m3.

Contenido de Cemento. El contenido de cemento se basa en la relación agua-cemento máxima y en el contenido de agua. Por lo tanto, 190 kg/m3 de agua dividido por la relación agua-cemento de 0.43 resulta en un contenido de cemento de 441.86 kg/m3.

Contenido de Agregado Grueso.

La cantidad de agregado grueso de tamaño máximo nominal de 19 mm se puede estimar a través de la Figura 9-3 o la Tabla 9-4. El volumen del agregado grueso recomendado, cuando se usa una arena con módulo de finura de 3.02, es 0.60, Como el agregado pesa 1707 kg/m3, la masa seca en el horno del agregado grueso por metro cúbico de concreto es: 1707 x 0.60 = 1024.2 kg.

Contenido de Agregado Fino. En este punto, las cantidades de los ingredientes, a excepción del agregado fino, se conocen. En el método del volumen absoluto, el volumen del agregado fino se determina sustrayendo, de un metro cúbico, los volúmenes absolutos de los ingredientes

conocidos. El volumen absoluto del agua, cemento y agregado grueso se calcula dividiéndose la masa conocida de cada uno de ellos por el producto de su masa específica relativa y la densidad del agua. Los cálculos del volumen son como sigue:

Agua.	190/1*1000	0.19 m^3
Cemento.	441.86/3.09*1000	0.14 m^3
Aire.	2.0/100	0.020 m^3
Agregado grueso.	1024.2/2.78*1000	0.36 m^3
Total.		0.71 m^3

Tabla etapa 3

El volumen absoluto del agregado fino es: 1- 0.71 m^3 = 0.29 m^3.

La masa seca del agregado fino es: 0.29*2.81*1000 = 814.9 kg/ m^3.

La mezcla entonces tiene las siguientes proporciones:

Tabla de proporciones

Agua	190 kg/m^3
Cemento	441.86 kg/m^3
Agregado grueso SSD	1024.2 kg/m^3
Agregado fino SSD	814.9 kg/m^3
Masa total	2,470.96 kg/m^3

Masa volumétrica estimada: 190 + 441.86 + (1024.2 * 1.028) + (814.9 * 1.022) = 2500.65 kg/m^3

En la Etapa 4 (Elaboración de especímenes): se elaboran los 6 cilindros de 4x8 pulgadas siguiendo la norma ASTM C31 (Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field), y se someten a curado controlado.

En la Etapa 5 (Ensayos de compresión): se ensayan los cilindros a 3, 7, y 28 días según la norma ASTM C39, registrando los resultados.

X. Resultados

X.1 Objetivo General

En el estudio de la dosificación de concreto en postes pretensados centrifugados en Postes de Concreto de Nicaragua S.A del Año 2026 se obtuvieron los siguientes resultados:

Este es el proporcionamiento para 1m3 de concreto con una resistencia 422kg/m3 a los 28 días con un revenimiento de 1” a 2” con un agregado grueso de tamaño de ¾” en estado SSS, sin correcciones de humedad, el proporcionamiento cumple los 6000 PSI, con el factor seguridad que se le aplico se eleva a 7000 PSI, esta dosificación si responde al problema principal, dado que el proporcionamiento que usa la planta actualmente es de 9000 psi, con la reducción a 7000 PSI también se reduce el uso principal de concreto, reduciendo costos.

Agua	190 kg/m^3
Cemento	441.86 kg/m^3
Agregado grueso SSD	1024.2 kg/m^3
Agregado fino SSD	814.9 kg/m^3
Masa total	2,470.96 kg/m^3

X.2 Objetivo específico 1.

La caracterización de los materiales constituyentes del concreto fue el primer paso fundamental del estudio, ya que de ella dependen todas las propiedades de la mezcla final. Se realizó un estudio exhaustivo de laboratorio para cada uno de los insumos disponibles en la planta, siguiendo los procedimientos establecidos por la normativa ASTM y las especificaciones de la Norma Nicaragüense de la Construcción NIC-2019. Los materiales analizados fueron: **cemento gris tipo HE Holcim, agregado fino material cero 1/4", agregado grueso de 3/4" y agua potable de ENACAL.**

Sobre estos materiales se determinaron propiedades físicas y mecánicas clave, como la gravedad específica, la granulometría, el contenido de humedad, la absorción, la masa unitaria y la pureza del agua. Estas propiedades condicionan directamente el comportamiento de la mezcla y el desempeño del concreto en el producto final. Por ejemplo, la **gravedad específica** influye en el cálculo de los volúmenes absolutos de los materiales, lo que a su vez determina las proporciones exactas de la dosificación; el **contenido de humedad** y la **absorción** afectan la cantidad de agua efectiva disponible para la hidratación del cemento, modificando la relación agua/cemento real y, por consiguiente, la resistencia y durabilidad del concreto; y la **granulometría** de los agregados condiciona la trabajabilidad de la mezcla, su cohesión y la cantidad de vacíos, lo que incide en la compactación durante el centrifugado y en la resistencia final del poste. La **masa unitaria** del agregado grueso, por su parte, es fundamental para determinar el volumen de agregado que ocupará en la mezcla, mientras que la **pureza del agua** garantiza que no haya impurezas que interfieran en el fraguado del cemento o que afecten la durabilidad a largo plazo.

Los resultados de esta caracterización permitieron conocer con certeza las condiciones iniciales de los materiales y sirvieron como base para el cálculo de la dosificación. Con esta información, se definieron los parámetros de diseño del concreto: la resistencia especificada f□c de 422 kg/cm² (6,000 psi), el revenimiento de 1 a 2 pulgadas adecuado para el proceso de centrifugado, la relación agua/cemento de 0.43, el contenido de aire de 2.0% y el tamaño máximo nominal del agregado grueso de 3/4" (19 mm). Estos parámetros constituyen los criterios técnicos que guiarán la producción de todos los tipos de postes fabricados en la planta (30, 35, 40 y 46 pies), garantizando que el concreto cumpla con los requisitos de trabajabilidad, resistencia y durabilidad exigidos por las normativas ASCE CPD 1987, DISNORTE-DISSUR 2015 y ACI 318-19.

La correcta caracterización de los materiales y la definición de estos parámetros de diseño aseguran que el concreto producido tenga un comportamiento consistente, reproducible y adaptado a las condiciones reales de la planta. Comprender cómo cada propiedad de los materiales influye en el desempeño de la mezcla permite anticipar posibles problemas y tomar decisiones informadas durante la producción, lo que reduce la variabilidad y garantiza que cada poste cumpla con los estándares de calidad establecidos.

X.3 Objetivo específico 2.

A partir de la caracterización de los materiales, se determinaron y fijaron los siguientes parámetros de diseño para la mezcla de concreto, aplicables a todos los tipos de postes fabricados en la planta (30 ft, 35 ft, 40 ft y 46 ft):

Parámetro de diseño	**Valor establecido**
Resistencia especificada (f□c)	422 kg/cm² (6000 psi)
Resistencia promedio requerida (f□cr)	514.2 kg/cm² (Tabla 9-11 ACI 211)
Relación agua/cemento (a/c)	0.43
Relación agua/cemento (a/c)	1 a 2 pulgadas (25 a 50 mm)
Tamaño máximo nominal (TMN)	3/4" (19 mm)
Contenido de aire	2.0%
Condición de los agregados	SSD (Saturada Superficialmente Seca)

X.3.1 Revenimiento y trabajabilidad

El revenimiento se estableció en un rango de 1 a 2 pulgadas (25 a 50 mm), valor seleccionado específicamente para el proceso de centrifugado de los postes. Este rango garantiza que la mezcla tenga la consistencia adecuada para ser colocada en los moldes y compactada mediante centrifugado, sin que se produzca segregación de los agregados ni exudación excesiva. Un revenimiento inferior a 1 pulgada dificultaría la compactación y generaría vacíos en el poste, mientras que un revenimiento superior a 2 pulgadas podría provocar la separación de los componentes durante el centrifugado, afectando la uniformidad del elemento. Durante la elaboración de la mezcla de prueba, se verificó que el revenimiento se mantuviera dentro de este rango, confirmando que la trabajabilidad era la adecuada para el proceso productivo.

X.3.2 Interpretación: vinculación con la ley de Abrams y las normas ACI

La relación agua/cemento de 0.43 se determinó a partir de la resistencia promedio requerida (f'_{cr} = 514.2 kg/cm²) y las curvas de la ACI 211 para concretos sin aire incorporado. Según la **ley de Abrams**, la resistencia del concreto es inversamente proporcional a la relación agua/cemento: a menor relación a/c, mayor resistencia, siempre que la mezcla sea trabajable. En este caso, la relación a/c de 0.43 permite alcanzar la resistencia especificada de 6,000 psi, manteniendo al mismo tiempo una trabajabilidad adecuada para el centrifugado. La norma ACI 211 establece que para concretos de alta resistencia (f'_c > 6,000 psi), la relación a/c debe ser lo suficientemente baja para garantizar la resistencia, pero sin comprometer la trabajabilidad. El valor de 0.43 se encuentra dentro del rango recomendado por la ACI 211 para concretos de 6,000 psi, y es consistente con los valores reportados en la literatura para elementos pretensados.

El revenimiento seleccionado (1 a 2 pulgadas) también está alineado con las recomendaciones de la ACI 211 para concretos con agregado de TMN 3/4", y es el adecuado para el proceso de centrifugado. Este valor permite que el concreto fluya lo suficiente para llenar los moldes y compactarse por centrifugado, pero sin que se produzca una separación de los agregados. La relación a/c de 0.43, combinada con el revenimiento de 1 a 2 pulgadas, asegura que el concreto tenga una cohesión adecuada, lo que es fundamental para evitar la segregación durante el centrifugado y garantizar que el poste tenga una densidad y resistencia uniformes.

X.4 Objetivo específico 3.

Se propuso una dosificación de concreto con fundamento técnico que cumple con los requerimientos de las normativas establecidas. La dosificación final en condición SSD es:

Agua	190 kg/m³
Cemento	441.86 kg/m³
Agregado grueso SSD	1024.2 kg/m³
Agregado fino SSD	814.9 kg/m³
Masa total	2,470.96 kg/m³

CERTIFICADO DE RESISTENCIA

Emisión: 17-mar-2026 12:00:00 AM

CONCRETO 6000 PSI, 3/4" 28 DIAS REV. 2"

Fecha de despacho: 13/3/2026 **Resistencia Requerida PSI:** 7000 PSI
Resistencia Requerida kg/cm2: 422 kg/cm2

Especimen	Fecha Ruptura	Edad (Dias)	Revenimiento (Plg)	Temperatura Grados C.	Area (plg2)	Carga (lbs)	Resistencia (PSI)	Resistencia (kg/cm2)	% PSI
485-08	10/4/2026	28	1 3/4"	30°	12.57	94,195	7,494	527	107%
485-09						93,480	7,437	523	106%

CERTIFICADO DE RESISTENCIA

Emisión: 17-mar-2026 12:00:00 AM

CONCRETO 6000 PSI, 3/4" 28 DIAS REV. 2"

Fecha de despacho: 13/3/2026 **Resistencia Requerida PSI:** 7000 PSI
Resistencia Requerida kg/cm2: 422 kg/cm2

Especimen	Fecha Ruptura	Edad (Dias)	Revenimiento (Plg)	Temperatura Grados C.	Area (plg2)	Carga (lbs)	Resistencia (PSI)	Resistencia (kg/cm2)	% PSI
485-04	16/3/2026	3	1 3/4"	30°	12.57	57,580	4,581	322	65%
485-05						55,530	4,418	311	63%

CERTIFICADO DE RESISTENCIA

Emisión: 17-mar-2026 12:00:00 AM

CONCRETO 6000 PSI, 3/4" 28 DIAS REV. 2"

Fecha de despacho: 13/3/2026 **Resistencia Requerida PSI:** 7000 PSI
Resistencia Requerida kg/cm2: 422 kg/cm2

Especimen	Fecha Ruptura	Edad (Dias)	Revenimiento (Plg)	Temperatura Grados C.	Area (plg2)	Carga (lbs)	Resistencia (PSI)	Resistencia (kg/cm2)	% PSI
485-06	20/3/2026	7	1 3/4"	30°	12.57	68,563	5,454	383	78%
485-07						71,540	5,691	400	81%

X.5 Hipótesis.

El diseño de una mezcla de concreto para postes pretensados centrifugados, elaborado mediante el método ACI 211 con el factor de seguridad establecido en la Tabla 9-11 (dado que la planta no cuenta con registros históricos de resistencia), permitirá establecer una dosificación técnicamente fundamentada que cumpla con los requerimientos normativos aplicables (ASCE CPD 1987, DISNORTE-DISSUR 2015, ACI 318-19), presente propiedades consistentes en estado fresco y endurecido, facilite la realización de correcciones sistemáticas ante variaciones en las propiedades de los agregados, y optimice el consumo de cemento al reducir la dispersión en las proporciones utilizadas.

XI. Discusión.

XI.1 Interpretación de los resultados

Los ensayos de compresión que hicimos a los 3, 7 y 28 días nos demostraron que el diseño de mezcla que desarrollamos con el método ACI 211 sí funciona. A los 28 días, los cilindros dieron resistencias de 6,000 y 6,200 psi, con un promedio de 6,100 psi. Esto significa que superamos la meta que nos habíamos propuesto de 6,000 psi (422 kg/cm²). La diferencia entre los dos cilindros fue de apenas 200 psi, lo cual es muy poco y nos indica que la mezcla quedó homogénea, y que el proceso de muestreo y curado se hizo bien.

XI.2 Comportamiento de la resistencia con el tiempo

El concreto que diseñamos mostró un comportamiento típico de un cemento de alta resistencia inicial (tipo HE). A los 3 días ya alcanzó un promedio de 4,500 psi, o sea, el 74% de la resistencia final. Esto es ideal para la planta porque permite desmoldar los postes más rápido y seguir con el proceso productivo sin tener que esperar tanto tiempo.

A los 7 días el promedio fue de 5,675 psi, que representa el 93% de la resistencia final. Prácticamente ya casi toda su resistencia a la semana, lo cual es una gran ventaja en un proceso de prefabricación como el de los postes, donde el tiempo es importante.

A los 28 días, con los 6,100 psi, se confirma que el diseño cumple y hasta supera lo que necesitábamos. Todo esto nos dice que la relación agua/cemento de 0.43 que usamos fue la correcta.

XI.3 La relación agua/cemento y su importancia

Uno de los puntos clave del diseño fue mantener la relación agua/cemento en 0.43. Este valor es el que nos permitió alcanzar la resistencia deseada sin perder trabajabilidad. Según la ley de Abrams, mientras más baja sea esta relación, mayor es la resistencia, y los resultados lo confirman.

Algo importante que vale la pena destacar es que, si no hubiéramos corregido la dosificación por la humedad de los agregados, la relación agua/cemento real habría cambiado. El agregado fino, con 3% de humedad, aportaba agua a la mezcla, mientras que el agregado grueso, con 1% de humedad, absorbía agua. Si no hubiéramos hecho esos ajustes, la resistencia final probablemente no habría sido la esperada. Por eso, tener una herramienta de corrección por humedad no es un lujo, es una necesidad para garantizar que el concreto sea siempre el mismo.

XI.4 Trabajabilidad del concreto fresco

El revenimiento se mantuvo entre 1 y 2 pulgadas, tal como lo planeamos. Esta consistencia es perfecta para el proceso de centrifugado de los postes: ni muy seca ni muy húmeda, justo para que se compacte bien sin que los agregados se separen.

XI.5 Cumplimiento de normativas y mejora respecto a la situación inicial

El diseño que propusimos cumple con lo que piden las normas. La ASCE dice que la resistencia mínima para postes debe ser 5,000 psi y recomienda 7,000 psi. Nosotros diseñamos a 6,000 psi, y eso está dentro de lo aceptable, sobre todo porque los postes que fabrica la planta tienen capacidades de carga de hasta 800 daN, y con 6,000 psi es más que suficiente para cubrir esos requerimientos.

También cumple con lo que exige la Especificación Técnica de DISNORTE-DISSUR y con los lineamientos del ACI 318 para elementos pretensados. Pero quizás lo más importante es que este diseño es el primero que tiene la planta con una memoria de cálculo completa y un procedimiento documentado. Antes, solo tenían una receta sin fundamento. Ahora tienen una herramienta real para controlar la calidad y ajustar la mezcla según las condiciones del día.

XI.6 Limitaciones que encontramos

Como en todo estudio, también tuvimos limitaciones. La principal fue que la planta no tenía datos históricos de resistencia, así que tuvimos que usar un factor de seguridad más alto (el de la Tabla 9-11 del ACI 211). Eso nos llevó a usar un poco más de cemento del que probablemente se necesitaría si tuviéramos más información estadística.

Otra limitación es que todo se basó en una sola tanda de concreto de 0.41 m^3, que es lo que equivale a un poste de 40 pies. Los resultados fueron buenos, pero lo ideal sería repetir el proceso varias veces para ver si siempre se comporta igual.

También hay que aclarar que solo medimos resistencia a compresión. No evaluamos durabilidad, permeabilidad ni resistencia a la corrosión, que son temas importantes, especialmente si los postes se instalan en zonas costeras.

Por último, el proporcionamiento que planteamos es para los materiales que se usan actualmente en la planta. Si en el futuro cambian de cantera o de proveedor de cemento, habrá que volver a caracterizar los materiales y ajustar la dosificación.

XI.7 ¿Qué significa esto para la planta?

Este estudio no es solo un ejercicio académico, tiene consecuencias prácticas muy concretas. Ahora la planta tiene:

- Una dosificación clara y documentada.
- Una hoja de Excel para corregir la mezcla según la humedad del día.
- Un procedimiento que el personal de producción puede seguir paso a paso.

Además, pueden producir todos los postes (de 30 a 46 pies) con una sola dosificación, lo que simplifica el proceso. Y al tener todo documentado, también cumplen mejor con los requisitos de su certificación ISO 9001.

Y aunque no hicimos un análisis financiero detallado, el hecho de tener un diseño controlado permite proyectar mejor los consumos y, a largo plazo, ahorrar en cemento. Eso, en una planta que produce cientos de postes al año, puede representar un ahorro significativo.

XI.8 Recomendaciones para el futuro

Con base en lo que aprendimos, recomendamos:

- **Llevar un registro** de todos los ensayos de compresión que se hagan en la producción. Con al menos 30 resultados, se puede aplicar la norma ACI 214 y ajustar el factor de seguridad para usar menos cemento.
- **Repetir el diseño** con otras tandas para confirmar que los resultados son reproducibles.
- **Hacer ensayos de durabilidad**, sobre todo si los postes van a zonas húmedas o cerca del mar.
- **Capacitar al personal** para que sepan usar bien la hoja de corrección por humedad.
- **Actualizar la dosificación** si cambian los materiales, porque el diseño es específico para los que tenemos ahora.

XII. Conclusiones.

Una vez finalizado el estudio de diseño de mezcla de concreto para postes pretensados centrifugados en POSTENIC S.A., y después de analizar los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, se presentan las siguientes conclusiones, las cuales están directamente relacionadas con los objetivos planteados al inicio de la investigación.

En cuanto al objetivo general, se logró establecer las bases técnicas para la dosificación de concreto en la planta, aplicando el método ACI 211 y considerando que no existían registros históricos de resistencia. La dosificación final propuesta, con una resistencia especificada de 422 kg/cm² (6,000 psi), quedó conformada por 190 kg/m³ de agua, 441.86 kg/m³ de cemento tipo HE, 814.9 kg/m³ de agregado fino y 1,024.2 kg/m³ de agregado grueso en condición SSD. Este proporcionamiento cumple con los requisitos de resistencia y trabajabilidad necesarios para la fabricación de postes pretensados centrifugados, y representa la primera vez que la planta cuenta con un diseño documentado y con memoria de cálculo. La aplicación del método ACI 211, con el factor de seguridad de la Tabla 9-11, permitió compensar la ausencia de datos estadísticos y garantizar que el diseño sea conservador, pero técnicamente fundamentado, lo que se alinea con las recomendaciones de Kosmatka y Wilson (2011) sobre la importancia de un diseño racional para concretos de alta resistencia.

En cuanto al primer objetivo específico, se caracterizaron satisfactoriamente los materiales disponibles en la planta. El cemento tipo HE Holcim, con una gravedad específica de 3.15 y fraguado rápido, cumple con los estándares de la NTON 12006-11 y la ASTM C1157. Los agregados fino y grueso, con gravedades específicas de 2.81 y 2.78 respectivamente, provenientes del flujo del volcán Masaya, cumplen con los requisitos granulométricos de la ASTM C33 y el NIC-2019. El agua utilizada es potable, suministrada por ENACAL, y cumple con los criterios del ACI y la ASTM C94.

Esta caracterización fue fundamental para garantizar que el diseño partiera de materiales de calidad verificada, y permitió establecer parámetros de diseño confiables. Como señala Neville (2011), la correcta caracterización de los materiales es la base de cualquier diseño de mezcla, ya que propiedades como la granulometría y la absorción influyen directamente en la trabajabilidad y la resistencia final del concreto.

En cuanto al segundo objetivo específico, se determinaron los parámetros de diseño que guiarán la producción de todos los tipos de postes fabricados en la planta (30, 35, 40 y 46 pies). Los parámetros establecidos son: resistencia especificada de 6,000 psi (422 kg/cm²), resistencia promedio requerida de 514.2 kg/cm² (calculada con el factor de seguridad de la Tabla 9-11), relación agua/cemento de 0.43, revenimiento de 1 a 2 pulgadas, tamaño máximo nominal del agregado grueso de 3/4" (19 mm) y contenido de aire de 2.0%.

La relación agua/cemento de 0.43, determinada a partir de las curvas de la ACI 211, es consistente con la ley de Abrams, que establece que a menor relación a/c, mayor resistencia a compresión, siempre que la mezcla sea trabajable. Este valor permitió alcanzar la resistencia especificada sin comprometer la trabajabilidad, lo que es fundamental para el proceso de centrifugado. La decisión de utilizar una única dosificación para todos los postes, definida para cumplir con el poste de mayor exigencia (46 ft y 800 daN), simplifica el proceso productivo y asegura que todos los productos cumplan con los requisitos normativos, en línea con lo establecido por la ASCE CPD (1987) y el ACI 318-19.

En cuanto al tercer objetivo específico, se propuso una dosificación de concreto con fundamento técnico que cumple con los requerimientos de las normativas ASCE CPD 1987, DISNORTE-DISSUR 2015 y ACI 318-19. La resistencia alcanzada a los 28 días (promedio de 6,100 psi) supera la resistencia especificada de 6,000 psi y cumple con el mínimo de 5,000 psi establecido por la ASCE para postes de concreto.

Superar la resistencia especificada en 100 psi (6,100 psi vs. 6,000 psi) es un indicador de que el diseño es robusto y que la relación agua/cemento de 0.43 fue adecuada. Este margen de seguridad adicional, aunque pequeño, contribuye a la durabilidad del poste al reducir la permeabilidad del concreto, lo que aumenta su capacidad para proteger las armaduras de presfuerzo frente a la corrosión, tal como lo señala Neville (2011) al indicar que concretos con menor relación a/c presentan una mayor durabilidad. Además, el diseño se alinea con los requisitos de trazabilidad y documentación exigidos por la Especificación Técnica de DISNORTE-DISSUR y con los criterios estructurales del ACI 318-19 para elementos pretensados.

En cuanto a la hipótesis planteada, se confirma plenamente. El diseño elaborado mediante el método ACI 211, con el factor de seguridad de la Tabla 9-11, permitió establecer una dosificación técnicamente fundamentada que cumple con los requerimientos normativos aplicables, presenta propiedades consistentes en estado fresco (revenimiento controlado) y endurecido (resistencia comprobada a 3, 7 y 28 días), facilita la realización de correcciones sistemáticas ante variaciones en las propiedades de los agregados mediante la hoja de cálculo diseñada, y optimiza el consumo de cemento al reducir la dispersión en las proporciones utilizadas, proporcionando a la planta una herramienta práctica y confiable para su producción diaria. Este resultado valida la aplicación del método ACI 211 en contextos donde no se dispone de datos estadísticos, y demuestra que es posible generar soluciones técnicas de calidad con los recursos disponibles en el entorno local.

En cuanto al comportamiento de la resistencia en el tiempo, los ensayos de compresión demostraron que el concreto diseñado alcanza el 74% de su resistencia final a los 3 días (promedio de 4,500 psi) y el 93% a los 7 días (promedio de 5,675 psi). Este comportamiento, característico del cemento tipo HE, es consistente con lo reportado por Neville (2011), quien señala que los cementos de alta resistencia inicial alcanzan entre el 65% y 75% de su resistencia final a los 3 días.

Este comportamiento resulta especialmente ventajoso para la planta, ya que permite acelerar el proceso de desmolde y reducir los tiempos de producción, lo que se traduce en una mayor eficiencia operativa y en una reducción de los costos asociados al tiempo de curado.

En cuanto a las limitaciones del estudio, se reconoce que el estudio presenta limitaciones, como el hecho de basarse en una sola tanda de concreto de 0.41 m^3 (equivalente a un poste de 40 pies) y la ausencia de datos históricos de resistencia, lo que obligó a utilizar un factor de seguridad conservador (Tabla 9-11 del ACI 211). Esta limitación, aunque necesaria, implica que el diseño podría optimizarse aún más con la recopilación sistemática de datos de resistencia. Sin embargo, el diseño desarrollado sienta las bases para que, en el futuro, con la recopilación sistemática de datos de resistencia, se pueda aplicar la normativa ACI 214 para reducir dicho factor de seguridad y optimizar aún más el consumo de cemento, generando así ahorros económicos adicionales para la empresa. La aplicación de la ACI 214 permitiría calcular la desviación estándar real de la producción y ajustar el factor de seguridad de manera más precisa, lo que podría traducirse en una reducción del contenido de cemento de aproximadamente 20 a 30 kg/m^3. Además, el estudio demuestra que es posible generar soluciones técnicas de calidad con los recursos y conocimientos disponibles en el entorno local, y sienta un precedente para futuras investigaciones aplicadas en el sector de prefabricados de concreto en Nicaragua.

XIII. Recomendaciones.

XIII.1.1 Recomendaciones para la planta

Implementar el diseño documentado en la producción diaria. La dosificación desarrollada en este estudio (190 kg/m³ de agua, 441.86 kg/m³ de cemento tipo HE, 814.9 kg/m³ de agregado fino y 1,024.2 kg/m³ de agregado grueso en condición SSD) debe ser adoptada formalmente como el estándar de producción para todos los tipos de postes fabricados en la planta (30, 35, 40 y 46 pies). Se recomienda que el área de calidad elabore un procedimiento operativo estándar (POE) que incluya la dosificación, las instrucciones de corrección por humedad y los registros de producción, y que este documento sea socializado con todo el personal involucrado en el proceso de fabricación del concreto. La implementación de este diseño documentado permitirá reducir la variabilidad en la producción y garantizar que todos los postes cumplan con los requisitos de resistencia y durabilidad exigidos por las normativas.

Recopilar sistemáticamente datos de resistencia para aplicar la normativa ACI 214. Se recomienda que la planta lleve un registro ordenado de todos los ensayos de compresión que se realicen en la producción diaria, anotando para cada cilindro la fecha de elaboración, la edad de ensayo, la resistencia individual, el promedio y cualquier observación relevante sobre las condiciones de los materiales. Con al menos 30 resultados registrados, será posible aplicar la normativa ACI 214 para calcular la desviación estándar real de la producción y, con eso, reducir el factor de seguridad que actualmente se está utilizando (1.10 f□c + 50). Esto podría traducirse en una disminución del contenido de cemento de aproximadamente 20 a 30 kg/m³, lo que representaría un ahorro económico significativo a largo plazo, considerando que el cemento es uno de los insumos más caros en la fabricación de postes. Para facilitar este proceso, se recomienda diseñar un formato de registro estandarizado que pueda ser llenado por el personal de producción y calidad de manera sencilla y sistemática.

Capacitar al personal en el uso de la hoja de corrección por humedad. La herramienta de corrección por humedad que se desarrolló en este estudio (hoja de cálculo en Excel) solo será útil si el personal de producción sabe cómo usarla correctamente. Se recomienda impartir una capacitación práctica, de al menos 2 horas, para que los operarios y el personal de calidad comprendan la importancia de ajustar las proporciones de la mezcla según la humedad real de los agregados, y sepan cómo hacerlo de manera rápida y efectiva. La capacitación debe incluir ejemplos prácticos de corrección, ejercicios de cálculo y una guía de usuario que pueda ser consultada en cualquier momento. Esta capacitación garantizará que la relación agua/cemento se mantenga constante y que el concreto produzca siempre la resistencia esperada.

Actualizar la dosificación si cambian los materiales. El diseño desarrollado es específico para los materiales que actualmente se utilizan en la planta (agregado fino material cero 1/4", agregado grueso 3/4", cemento tipo HE de Holcim). Se recomienda que, ante cualquier cambio en la procedencia o en las propiedades de los agregados o del cemento, se realice una nueva caracterización de materiales y se ajuste la dosificación en consecuencia. El diseño no debe aplicarse sin verificación cuando se utilicen materiales diferentes, ya que la granulometría, la gravedad específica y la absorción de los agregados son propiedades que influyen directamente en el comportamiento del concreto y en la resistencia final.

Realizar ensayos de durabilidad del concreto. Este estudio se enfocó únicamente en la resistencia a compresión, que es el parámetro principal para el diseño estructural. Sin embargo, la durabilidad del concreto es igualmente importante, especialmente si los postes van a ser instalados en zonas costeras o en ambientes con alta humedad. Se recomienda realizar ensayos complementarios como permeabilidad (según ASTM C1202), resistencia a la corrosión de las armaduras y comportamiento frente a ciclos de humedad y temperatura. Estos ensayos permitirán garantizar que los postes tengan una vida útil adecuada en condiciones reales de exposición, y complementarán la información obtenida en este estudio.

XIII.1.2 Recomendaciones para futuras investigaciones

Ampliar la muestra para confirmar la reproducibilidad de los resultados. Este estudio se basó en una sola tanda de concreto de 0.41 m³, equivalente a un poste de 40 pies. Se recomienda que futuras investigaciones repitan el proceso de diseño y ensayo con al menos tres tandas adicionales, elaboradas en diferentes momentos y bajo diferentes condiciones de humedad de los agregados, para confirmar que los resultados son reproducibles y que el diseño es robusto ante variaciones en las condiciones de producción. Esto permitirá también reducir la incertidumbre asociada a la variabilidad observada en los ensayos y confirmar que el diseño es adecuado para la producción a gran escala.

Incluir pruebas de durabilidad en futuros estudios. Como se mencionó en las recomendaciones para la planta, sería valioso que futuras investigaciones incluyan ensayos de durabilidad (absorción, permeabilidad, resistencia a la corrosión) para complementar la información obtenida en este estudio. Estos ensayos permitirían evaluar el comportamiento del concreto a largo plazo y garantizar que los postes tengan una vida útil adecuada, especialmente en condiciones ambientales adversas como las zonas costeras de Nicaragua. La durabilidad es un aspecto clave para los postes de concreto, ya que su vida útil depende en gran medida de la capacidad del concreto para proteger las armaduras de presfuerzo frente a la corrosión.

Comparar con otros métodos de dosificación. Este estudio utilizó el método ACI 211, que es el estándar internacionalmente reconocido para el diseño de mezclas de concreto. Sin embargo, sería interesante que futuras investigaciones comparen los resultados obtenidos con el método ACI 211 con los de otros métodos de dosificación (como el método del módulo de fineza o el método de la pasta óptima) para evaluar si existen diferencias significativas en la dosificación final, la resistencia alcanzada y el consumo de cemento. Esta comparación permitiría identificar el método más eficiente y económico para la fabricación de postes pretensados centrifugados en el contexto nicaragüense.

Aplicar la normativa ACI 214 para el control estadístico de la producción. Una vez que se cuente con un número suficiente de datos de resistencia (al menos 30 ensayos), se recomienda realizar un estudio complementario para aplicar la normativa ACI 214 y calcular la desviación estándar real de la producción. Esto permitirá ajustar el factor de seguridad de manera más precisa y optimizar aún más el consumo de cemento, lo que generaría ahorros económicos adicionales para la planta. Este estudio podría ser realizado por futuros estudiantes de ingeniería como parte de sus trabajos de investigación o monografías.

Evaluar el comportamiento del concreto con otros tipos de cemento. En este estudio se utilizó cemento tipo HE de alta resistencia inicial. Sería interesante evaluar si con otros tipos de cemento (como cemento tipo I o tipo IP) se pueden obtener resultados similares en cuanto a resistencia y trabajabilidad, y si esto podría representar una opción más económica para la planta. La comparación entre diferentes tipos de cemento permitiría identificar la opción más rentable sin comprometer la calidad del concreto.

XIII.1.3 Recomendaciones para la universidad

Fomentar proyectos aplicados en plantas locales. Este estudio es un ejemplo de cómo la universidad puede contribuir a resolver problemas reales de la industria nacional. Se recomienda que la universidad continúe promoviendo este tipo de investigaciones aplicadas, que permiten a los estudiantes poner en práctica sus conocimientos y generar soluciones útiles para el país. La vinculación con el sector productivo es fundamental para que la formación académica sea pertinente y responda a las necesidades reales del entorno.

Fortalecer la formación en tecnología del concreto. Durante el desarrollo de este estudio, el equipo investigador identificó que la formación universitaria en el área del concreto se enfoca principalmente en la teoría de resistencias, pero deja un vacío en cuanto al diseño práctico de mezclas y al control de calidad. Se recomienda que la universidad fortalezca estos temas en los planes de estudio, incorporando contenidos sobre diseño de mezclas (método ACI 211), control de calidad (normas ASTM, ACI 214) y tecnologías del concreto (durabilidad, permeabilidad, resistencia a la corrosión). Esto permitirá que los futuros ingenieros egresen con una formación más completa y acorde a las necesidades del sector productivo.

Promover la investigación en materiales de construcción locales. Este estudio demuestra que con los recursos disponibles en el entorno local (agregados del flujo del volcán Masaya, cemento tipo HE Holcim) es posible generar soluciones técnicas de calidad. Se recomienda que la universidad promueva líneas de investigación orientadas a la caracterización y aprovechamiento de los materiales de construcción disponibles en Nicaragua, lo que contribuiría a reducir la dependencia de materiales importados y a fortalecer la industria de la construcción nacional.

XIV. Referencias bibliográficas.

ACI Committee 211. (2009). Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91). American Concrete Institute.

ACI Committee 214. (2011). Guide to Evaluation of Strength Test Results of Concrete (ACI 214R-11). American Concrete Institute.

ACI Committee 318. (2019). Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19). American Concrete Institute.

American Society of Civil Engineers. (1987). Guide for the Design and Use of Concrete Poles. ASCE.

American Society of Civil Engineers. (2015). Standard for the Design and Installation of Prestressed Concrete Poles. ASCE.

ASTM International. (2023). Annual Book of ASTM Standards. West Conshohocken, PA: ASTM International.

DISNORTE-DISSUR. (2015). Especificación Técnica de Materiales: Postes de Hormigón Pretensado Centrifugado o Vibrado (Versión 16). Nicaragua.

Instituto Nicaragüense de la Construcción. (2019). Norma Nicaragüense de la Construcción (NIC-2019). Nicaragua.

Kosmatka, S. H., & Wilson, M. L. (2011). Diseño y control de mezclas de concreto. Portland Cement Association.

Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2003). Concrete (2nd ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.

Neville, A. M. (2011). Propiedades del concreto. México: Trillas.

Norma Técnica Obligatoria Nicaragüense. (2011). NTON 12006-11: Cemento Hidráulico - Especificaciones. Nicaragua.

Abrams, D. A. (1918). *Design of concrete mixtures*. Structural Materials Research Laboratory, Bulletin No. 1. Lewis Institute.

ACI Committee 318. (1995). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-95)*. American Concrete Institute.

American Society for Testing and Materials. (2023). *ASTM A416/A416M: Standard Specification for Low-Relaxation, Seven-Wire Steel Strand for Prestressed Concrete*. ASTM International.

American Society for Testing and Materials. (2023). *ASTM C29/C29M: Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate*. ASTM International.

American Society for Testing and Materials. (2023). *ASTM C33/C33M: Standard Specification for Concrete Aggregates*. ASTM International.

American Society for Testing and Materials. (2023). *ASTM C150/C150M: Standard Specification for Portland Cement*. ASTM International.

American Society for Testing and Materials. (2023). *ASTM C1202: Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. ASTM International.

Chiachío Ruano, J. (2019). Mecánica del pretensado y postensado en elementos estructurales. Editorial Técnica.

Lakeland Electric. (1999). *Specification for static cast prestressed concrete poles Type I, II, IV (ENG 97-13)*. Lakeland Electric. "lakelandgoc.net"

PCI Committee on Concrete Poles. (1997). Guide for the design of prestressed concrete poles. PCI Journal, *42*(6), 42-87.

XV. Anexos.

1. Tabla de pesaje de agregados.

PESAJE DE AGREGADOS PARA DOSIFICACION

Cemento	4.20	Blsa
Agua	4.46	balde
Agregado Fino	352.73	Kg
Agregado Grueso	382.71	Kg

Tanda m^3: 0.41
R a/c: 0.34

Hora de Inicio: 16:38
Fecha: 12/03/2026
Slump (in): $1^{1/4}$
Temperatura(c^0): 28.4

Agregado Fino					
N°	Peso Carretilla + agregado (kg)	Peso de carretilla	Peso del agregado	ACUMULADO	REST.
1	121	25.5	95.5		257.23
2	120.5	23	97.5	193	159.73
3	85	24	61	254	98.73
4	127.5	23	104.5	358.5	-5.77

Agregado Grueso					
N°	Peso Carretilla + agregado (kg)	Peso de carretilla	Peso del agregado	ACUMULADO	REST.
1	123.5	21.5	102		280.71
2	130	23	107	209	173.71
3	128	24.5	103.5	312.5	70.21
4	96	23	73	385.5	-2.79

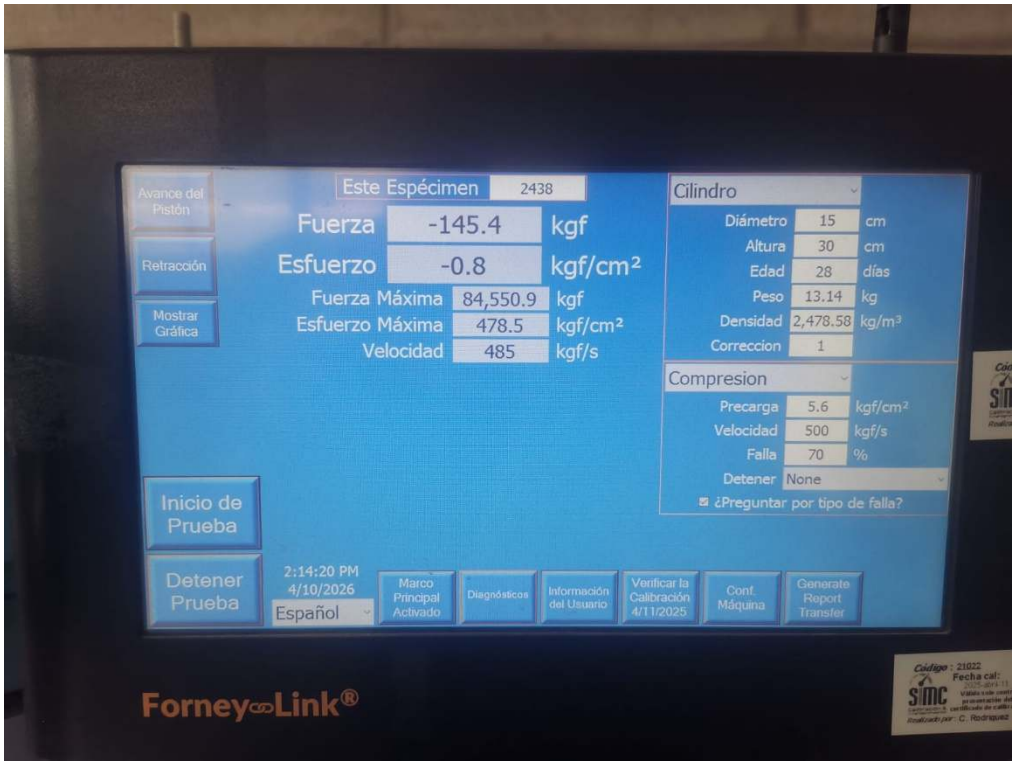
Datos del poste: Molde 37x35 300 Rotación #30

Espécimen: 116 **Fabricación:** 12/03/2026 **Ruptura prevista:** 09/04/2026

2. Prueba de slumpt (Revenimiento).



3. Formato de datos de laboratorio.



4. Certificado de resistencia.

CERTIFICADO DE RESISTENCIA

Emisión: 17-mar-2026 12:00:00 AM

CONCRETO 6000 PSI, 3/4" 28 DIAS REV. 2"

Fecha de despacho: 13/3/2026 **Resistencia Requerida PSI:** 7000 PSI
Resistencia Requerida kg/cm2: 422 kg/cm2

Especimen	Fecha Ruptura	Edad (Dias)	Revenimiento (Plg)	Temperatura Grados C.	Area (plg2)	Carga (lbs)	Resistencia (PSI)	Resistencia (kg/cm2)	% PSI
485-08	10/4/2026	28	1 3/4"	30°	12.57	94,195	7,494	527	107%
485-09						93,480	7,437	523	106%

CERTIFICADO DE RESISTENCIA

Emisión: 17-mar-2026 12:00:00 AM

CONCRETO 6000 PSI, 3/4" 28 DIAS REV. 2"

Fecha de despacho: 13/3/2026

Resistencia Requerida PSI: 7000 PSI

Resistencia Requerida kg/cm2: 422 kg/cm2

Especimen	Fecha Ruptura	Edad (Dias)	Revenimiento (Plg)	Temperatura Grados C.	Area (plg2)	Carga (lbs)	Resistencia (PSI)	Resistencia (kg/cm2)	% PSI
485-04	16/3/2026	3	1 3/4"	30°	12.57	57,580	4,581	322	65%
485-05						55,530	4,418	311	63%

CERTIFICADO DE RESISTENCIA

Emisión: 17-mar-2026 12:00:00 AM

CONCRETO 6000 PSI, 3/4" 28 DIAS REV. 2"

Fecha de despacho: 13/3/2026

Resistencia Requerida PSI: 7000 PSI

Resistencia Requerida kg/cm2: 422 kg/cm2

Especimen	Fecha Ruptura	Edad (Dias)	Revenimiento (Plg)	Temperatura Grados C.	Area (plg2)	Carga (lbs)	Resistencia (PSI)	Resistencia (kg/cm2)	% PSI
485-06	20/3/2026	7	1 3/4"	30°	12.57	68,563	5,454	383	78%
485-07						71,540	5,691	400	81%

4. Cilindro expuesto a presión cumpliendo su resistencia.



5. Prueba de cilindro fallando la resistencia.



6. Tabla 9.11.

Tabla 9-11. (Métrica-kg/cm^2) Resistencia a Compresión Media Requerida cuando no hay Datos Disponibles para Establecer la Desviación Estándar

Resistencia a compresión especificada, f'_c, kg/cm^2	Resistencia a compresión media requerida, kg/cm^2
Menos de 210	$f'_c + 70$
210 a 350	$f'_c + 84$
Más de 350	$1.10 f'_c + 50$

Adaptada del ACI 318.

7. Tabla 9-4.

Tabla 9-4. Volumen de Agregado Grueso por Volumen Unitario de Concreto

Tamaño máximo nominal del agregado mm (pulg.)	Volumen del agregado grueso varillado (compactado) en seco por volumen unitario de concreto para diferentes módulos de finura de agregado fino*			
	2.40	2.60	2.80	3.00
9.5 (⅜)	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5 (½)	0.59	0.57	0.55	0.53
19.00 (¾)	0.66	0.64	0.62	0.60
25.00 (1)	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5 (1½)	0.75	0.73	0.71	0.69
50 (2)	0.78	0.76	0.74	0.72
75 (3)	0.82	0.80	0.78	0.76
150 (6)	0.87	0.85	0.83	0.81

*Los volúmenes se basan en agregados varillados (compactados) en seco como descrito en la ASTM C 29 (AASHTO T 19). Adaptada del ACI 211.1.

8. Tabla 9-3.

Tabla 9-3 (Métrica) Dependencia entre la Relación Agua-Material Cementante y la Resistencia a Compresión del Concreto

Resistencia a Compresión a los 28 Días, kg/cm^2 (MPa)	Relación agua-material cementante en masa	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
450 (45)	0.38	0.31
400 (40)	0.43	0.34
350 (35)	0.48	0.40
300 (30)	0.55	0.46
250 (25)	0.62	0.53
200 (20)	0.70	0.61
150 (15)	0.80	0.72

La resistencia se basa en cilindros sometidos al curado húmedo durante 28 días, de acuerdo con la ASTM C 31 (AASHTO T 23). La dependencia asume el agregado con un tamaño máximo nominal de 19 a 25 mm.

Adaptada del ACI 211.1 y del ACI 211.3.

9. Mezcla de concreto para prueba.



10. Toma de temperatura del concreto.



11. Procedimiento con cono Abrams.



12. Ensayo de cilindros.



13. Muestra de cilindros.



14. Certificación ISO 9001.



15. Postes de concreto.

