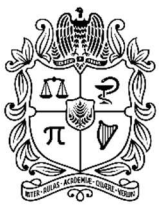


UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

GUÍA METODOLÓGICA PARA LA CORRECTA IMPLEMENTACIÓN DEL PULIMENTO DE ESPECÍMENES CILÍNDRICOS DE CONCRETO COMO MÉTODO DE REFRENTADO NO ADHERIDO

Angela Florez Gelves

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Artes, Maestría en Construcción
Bogotá, Colombia
2023

GUÍA METODOLÓGICA PARA LA CORRECTA IMPLEMENTACIÓN DEL PULIMENTO DE ESPECÍMENES CILÍNDRICOS DE CONCRETO COMO MÉTODO DE REFRENTADO NO ADHERIDO

Angela Florez Gelves

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería Civil

Director (a):

MIC, Daniel Rojas Mora

Línea de Investigación:

Materiales

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Artes, Maestría en Construcción

Bogotá, Colombia

2023

“El trabajo duro vence al talento cuando el talento no trabaja duro”
Tim Notke

A mi compañero de vida y a mi hija, mi inspiración para ser cada día mejor.

Declaración de obra original

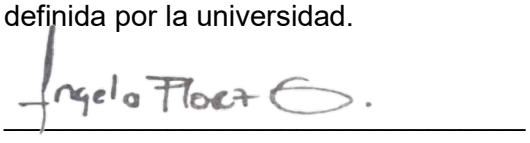
Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



Angela Florez Gelves

Fecha 15/01/2023

Fecha

Agradecimientos

Agradezco inmensamente a todas aquellas personas que de una u otra forma contribuyeron para la elaboración del presente trabajo de grado, principalmente a mi familia mis padres Luis Ernesto Florez y Miriam Gelves Torres por el ejemplo, la formación y por otorgarme las herramientas para salir adelante, a mi compañero y socio de vida Jose Granados por ser mi complemento y brindarme siempre su apoyo incondicional, a mi hija Victoria por ser la inspiración para ser mejor profesional y ser humano cada día.

Agradezco especialmente a mi director de trabajo de grado el ingeniero Daniel Rojas Mora por su acompañamiento y apoyo incondicional, por compartir su conocimiento estaré siempre agradecida.

A CEMEX COLOMBIA SA por el diseño de mezcla y la elaboración de los especímenes de concreto utilizados para el desarrollo metodológico del presente trabajo.

Al laboratorio de ensayo de materiales GEOLAB INGENIERÍA Y LABORATORIO SAS por la realización de los ensayos de resistencia a la compresión y la toma de los datos necesarios para los análisis realizados.

Al laboratorio de ensayo de materiales CONCRELAB SAS por realizar el pulimento de los especímenes de concreto y la toma del registro fotográfico del proceso realizado.

Resumen

Guía metodológica para la correcta implementación del pulimento de especímenes cilíndricos de concreto como método de refrentado no adherido

El concreto es uno de los materiales más utilizados en construcción alrededor del mundo, por esto las propiedades que definen su calidad y durabilidad son verificadas a través de ensayos de laboratorio estandarizados. Debido a que el concreto trabaja muy bien a compresión puede decirse que esta propiedad determina su calidad (Mantallana, R, 2019). En Colombia las normas NTC 550 (2020) y NTC 673 (2021) rigen los procedimientos de elaboración de especímenes cilíndricos y ensayo de resistencia a la compresión respectivamente. En la práctica se encuentran diferentes variables que condicionan el resultado final del ensayo, entre otros factores, las condiciones de las caras de los cilindros y de los testigos influyen considerablemente en los resultados de las pruebas (Kosmatka, S. H. et al., 2004). El refrentado, capinado o cabeceo de los cilindros se realiza convencionalmente con métodos adheridos como el yeso de alta resistencia o azufre; y no adheridos como el uso de almohadillas de neopreno. Para cada uno de estos métodos se han detectado limitaciones en cuanto a la resistencia de los materiales que se usan, estas son poco conocidas por los técnicos que realizan los ensayos en el laboratorio. El objetivo del presente trabajo de grado es desarrollar una guía metodológica para la correcta aplicación del refrentado, utilizando como método alternativo el pulimento de las superficies de carga de los especímenes cilíndricos de

concreto. Con este fin se realiza la comprobación del método y el análisis de los resultados desde un enfoque cuantitativo con un diseño experimental.

Palabras clave: Refrentado, capinado, cabeceo, resistencia a la compresión, especímenes

Abstract

Methodological guide for the correct implementation of polishing of cylindrical concrete specimens as a non-adhered facing method

Concrete is one of the most used materials in construction around the world, for this reason the properties that define its quality and durability are verified through standardized laboratory tests. Because concrete works very well in compression, it can be said that this property determines its quality (Mantallana, R, 2019). In Colombia, the NTC 550 (2020) and NTC 673 (2021) standards govern the procedures for the preparation of cylindrical specimens and the compression resistance test, respectively. In practice there are different variables that condition the final result of the test, among other factors, the conditions of the faces of the cylinders and of the witnesses considerably influence the results of the tests (Kosmatka, S. H. et al., 2004). The facing, capping or pitching of the cylinders is done conventionally with adhered methods such as high resistance plaster or sulfur; and not adhered like the use of neoprene pads. For each of these methods, limitations have been detected in terms of the resistance of the materials used, these are little known by the technicians who carry out the tests in the laboratory. The objective of this degree work is to develop a methodological guide for the correct application of facing, using as an alternative method the polishing of the load-bearing surfaces of cylindrical concrete specimens. To this end, the verification of the method and

the analysis of the results are carried out from a quantitative approach with an experimental design.

Keywords: Facing, capping, pitching, compressive strength, specimens.

Contenido

Pág.

Resumen ..... **IX**

Abstract ..... **XI**

Lista de figuras ..... **XV**

Lista de tablas ..... **XVII**

Introducción **1**

1. Preguntas de investigación **1**

2. Planteamiento del problema **3**
2.1 Objetivos 6
2.1.1 Objetivo General 7
2.1.2 Objetivos Específicos 7
2.2 Antecedentes 7

3. Marco Teórico **11**
3.1 Normativa 11
3.2 Tipos de refrentado 12
3.2.1 Refrentado no adherido: almohadilla de neopreno 14
3.2.2 Refrentado adherido: mortero de azufre 17
3.2.3 Refrentado no adherido con máquina para pulido de concreto 18
3.3 Ensayo de compresión 22

4. Desarrollo metodológico del proyecto **25**
4.1 Diseño de mezcla 27
4.1.1 Agua 27
4.1.2 Grava 27
4.1.3 Arena 28
4.1.4 Cemento hidráulico 29
4.1.5 Aditivos 31
4.2 Elaboración y curado de los especímenes cilíndricos de concreto 32
4.3 Refrentado 36
4.3.1 Refrentado con pulimento 37
4.3.2 Refrentado con azufre 39
4.3.3 Refrentado con almohadilla de neopreno 41
4.4 Ensayo de resistencia a la compresión simple 43

4.5 Validación del método de refrentado por pulimento 45
4.6 Análisis de resultados 45
4.7 Guía metodológica aplicación de refrentado mediante pulimento de las superficies de carga para pruebas de resistencia a la compresión de muestras cilíndricas de concreto 56
4.7.1 Introducción 56
4.7.2 Objeto 57
4.7.3 Campo de aplicación 57
4.7.4 Referencias normativas utilizadas 58
4.7.5 Términos y definiciones 58
4.7.6 Importancia y uso 59
4.7.7 Materiales y equipos 60
4.7.8 Otras instalaciones 61
4.7.9 Especímenes de ensayo 61
4.7.10 Procedimiento: 61
4.7.11 Conclusiones y recomendaciones finales 63

5. Conclusiones 65

Bibliografía 67

A. Anexo: Informes de resultados ensayos de laboratorio 71

Lista de figuras

Pág.

Figura 3-1: Tipos de refrentado objeto de estudio 12
Figura 3-2: Especificaciones técnicas de anillos de retención y placa base..... 14
Figura 3-3: Resultados de la resistencia individual de especímenes cilíndricos tratados con diferentes tipos de refrentado 21
Figura 3-4: Tipos de falla..... 23
Figura 4-1: Desarrollo metodológico..... 26
Figura 4-2: Granulometría gravas agregados el Cajón 28
Figura 4-3: Granulometría arenas Corame..... 29
Figura 4-4: Toma del asentamiento de la mezcla en estado fresco 33
Figura 4-5: Elaboración de los especímenes cilíndricos de concreto..... 35
Figura 4-6: Curado de cilindros..... 36
Figura 4-7: Máquina pulidora..... 38
Figura 4-8: verificación de la planitud..... 39
Figura 4-9: Equipo de laboratorio requerido 40
Figura 4-10: Acabado refrentado azufre 40
Figura 4-11: Equipo de laboratorio requerido refrentado no adherido (Econocap) y almohadilla de neopreno 42
Figura 4-12: Posicionamiento platos de retención (Econocap) y almohadilla de neopreno 42
Figura 4-13: Datos atípicos resistencia cilindros refrentados con Pulimento..... 47
Figura 4-14: Datos atípicos resistencia cilindros refrentados con Azufre 47
Figura 4-15:: Datos atípicos resistencia cilindros refrentados con Almohadilla de Neopreno 49
Figura 4-16: Grafica de probabilidad refrentado con pulimento 50
Figura 4-17: Grafica de probabilidad refrentado con azufre..... 51

Figura 4-18: Grafica de probabilidad refrentado con almohadilla de neopreno.....51
Figura 4-19: Grafica de valores individuales – Resistencia a la compresión MPa 53
Figura 4-20: verificación de la planitud 62
Figura 4-21: verificación de la perpendicularidad 63

Lista de tablas

Pág.

Tabla 2-1: Características principales para la aplicación de refrentados en especímenes cilíndricos de concreto y núcleos extraídos. 4
Tabla 3-1: Especificaciones para el uso de almohadillas de neopreno 16
Tabla 3-2: Resistencia a la compresión y espesor máximo de los materiales de refrentado..... 17
Tabla 4-1:: Diseño de mezcla..... 27
Tabla 4-2: Parámetros Mecánicos 30
Tabla 4-3: Parámetros Físicos 30
Tabla 4-4: Características Isoplast 157 31
Tabla 4-5: Características Isoflow 751 31
Tabla 4-6: Características Isoretard 212 32
Tabla 4-7: Requisitos para el método de compactación 34
Tabla 4-8: Requisitos de tamaño, tipo y moldeo por apisonamiento 34
Tabla 4-9: Cantidad de especímenes cilíndricos y tipología de refrentado. 37
Tabla 4-10:Resumen equipo, consumibles y tiempo de refrentado con pulimento 39
Tabla 4-11: Resumen equipo, consumibles y tiempo de refrentado con azufre..... 41
Tabla 4-12:resumen equipo, consumibles y tiempo refrentado con almohadilla de neopreno 43
Tabla 4-13:Resistencia a la compresión en MPa 44

Introducción

De los materiales de construcción el concreto es el más utilizado alrededor del mundo y ha jugado un papel vital en la configuración del entorno físico de la humanidad (Nichelson, Brian J, 2020). Los cementantes tienen una larga historia, su empleo se remonta a la época donde el hombre se vio en la necesidad de construir su propia habitación utilizando arcilla o una mezcla de cal y arena para mantener juntas las piedras, sin embargo, no hay forma de determinar cuándo se usó por primera vez un material aglomerante. El dato más exacto de empleo de materiales cementantes se remonta al año 2690 A.C. en la construcción de la pirámide de Guiza por parte de los egipcios. Durante los siglos posteriores no hubo avances significativos hasta que el inglés Isaac Johnson logró perfeccionar una mezcla fuertemente cementante utilizada en Inglaterra y Europa para la fabricación de cemento en pequeñas cantidades. Siguiendo la línea de tiempo no fue hasta 1900 que se inició la fabricación industrial de cemento gracias a la invención del molino y el horno rotatorio, que dieron lugar al crecimiento de esta industria (Sánchez de Guzmán, 2001). A lo largo de la historia el uso del concreto ha estado ligado al desarrollo de las grandes civilizaciones y su centralización ya que permitía la construcción en altura y en formas antes no concebidas, por todo lo anterior sus propiedades, principalmente la resistencia y durabilidad, son constantemente estudiadas para garantizar el buen comportamiento del concreto luego de su implementación.

El concepto de calidad de los materiales de construcción ha tomado mucha importancia como herramienta fundamental para la toma de decisiones tanto para las organizaciones como para los consumidores; según Lara (9982), la primera documentación del concepto de calidad en construcción se remonta al año 2150 A.C., donde la calidad de la construcción de casas estaba regida por el código de Hammurabi, regla 229: “sí un constructor construye una casa y no lo hace con buena resistencia y la casa se derrumba y mata a los ocupantes, el constructor debe ser ejecutado”; igualmente existen evidencias del aseguramiento de la calidad en otras civilizaciones, como la egipcia, los mayas, los fenicios, los griegos, etc. A través de la historia este principio fue evolucionando hasta el concepto de gestión de calidad conocido en la actualidad. Este concepto es sumamente relevante para este estudio puesto que la calidad de los concretos se verifica por medio de ensayos de laboratorio estandarizados; así las normativas colombianas que establecen los lineamientos para estandarizar la calidad del concreto son una adaptación de la ASTM (American Society for Testing and Materials), organización fundada en 1898. Por su parte, el ICONTEC (Instituto Colombiano de Normas Técnicas), fundado en 1963 es el ente nacional de normalización.

Para determinar la calidad de los concretos, se realiza el ensayo de resistencia a la compresión en muestras cilíndricas elaboradas del concreto en cada mezclado , el ensayo de resistencia a compresión es el más utilizado debido a su sencillez, bajo costo y la variada oferta encontrada en el mercado, sin embargo para obtener los resultados esperados, los procedimientos desde la elaboración de las probetas hasta la falla, deben seguir rigurosamente las actividades descritas en las normas NTC 454 (2019) elaboración y curado de probetas cilíndricas de concreto y NTC 673 (2021) ensayo de resistencia a la compresión de probetas cilíndricas de concreto. De acuerdo con Sánchez de Guzmán (2001), una vez se encuentran elaboradas las probetas cilíndricas las caras

de los cilindros sobre las cuales se aplica la carga no son planas lo que puede concentrar los esfuerzos y reducir la resistencia real del espécimen en estudio.

Generalmente esta superficie es áspera y no plana, lo cual puede conducir a concentraciones de esfuerzos que reducen considerablemente la resistencia real del concreto. Una falta de planicie de 0.25 mm puede reducir en un tercio la resistencia. Para remediar esta situación, normalmente se hace un refrentado o cabeceado de las tapas del cilindro con materiales como yeso o mezclas compuestas de azufre, tal como se especifica en la norma NTC 504. (p. 139)

Debido a esta gran variación en los resultados del ensayo atribuida a la falta de planitud, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar el método de pulimento de las caras para lograr una planicie adecuada para la aplicación de carga, se realizará la comprobación del método y se redactará una guía para su implementación.

Entendiendo la importancia que tiene la correcta aplicación del refrentado o cabeceo de los especímenes cilíndricos de concreto para determinar la resistencia a la compresión el presente trabajo desarrolló un diseño metodológico dividido en cuatro etapas; en la primera etapa se enunciaran los diferentes métodos de refrentado y sus principales limitaciones, en la segunda etapa se realiza la comprobación del método mediante la elaboración y falla de las muestras de concreto, en la tercera etapa se evaluaran los resultados obtenidos y finalmente se elaborara la guía técnica para la correcta implementación del refrentado por pulimento.

1. Preguntas de investigación

Atendiendo a las sugerencias de Hernández (2014) y de Creswell & Creswell (2018) para la formulación de preguntas de investigación en un enfoque cuantitativo se plantean las siguientes preguntas que llevarán al planteamiento del problema:

¿Cómo debe implementarse el pulido como método de refrentado no adherido en pruebas de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto para responder a la norma NTC 673?

¿Puede el refrentado por pulimento disminuir la variación en los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión en especímenes cilíndricos?

¿Qué método de refrentado es óptimo para pruebas de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto?

2. Planteamiento del problema

El refrentado se realiza previamente a la aplicación de cargas, la finalidad de su aplicación es lograr la planitud de las caras del espécimen, la norma NTC 673 (2021) indica que ningún extremo de los especímenes debe apartarse de la perpendicularidad a los ejes en más de 0.5°, equivalente a 1 mm en 100 mm, cuando los extremos de los especímenes no sean planos en más de 0.05 mm deben ser pulidos o refrentados, sin embargo, no existe en la normativa el procedimiento para el pulimento como un método alternativo a los refrentados utilizados comúnmente, por esta razón se propone redactar una guía metodológica para realizar el pulimento y obtener la planitud requerida de los extremos de los especímenes utilizados para el ensayo de resistencia a la compresión.

Definida la importancia de la planitud de los extremos de los especímenes y su influencia en la variabilidad en los resultados del ensayo de resistencia a compresión, en el planteamiento del problema se aborda la necesidad de obtener una guía metodológica para llevar a cabo el refrentado de especímenes cilíndricos de concreto a través del pulimento de las caras o superficies de carga como una alternativa a los métodos contenidos en las normas técnicas colombianas NTC 504 (2021) refrentado de especímenes cilíndricos de concreto métodos adheridos y NTC 3708 (2019) uso de

refrentado no adherido para la determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto endurecido.

Lograr obtener un refrentado de buena calidad para los cilindros de concreto endurecido y núcleos aserrados con los métodos convencionales contenidos en la normativa colombiana puede llegar a ser una actividad compleja, que requiere una evaluación de los principales factores a tener en cuenta, en la **Tabla 2-1** se presenta en paralelo la información para la aplicación de los métodos de refrentado estandarizados y se incluye el análisis de la propuesta del refrentado por pulimento.

Tabla 2-1: Características principales para la aplicación de refrentados en especímenes cilíndricos de concreto y núcleos extraídos.

	PULIMENTO	**AZUFRE**	**NEOPRENO**
TIPO DE REFRENTADO	**MUESTRAS ESTÁNDAR ELABORADAS NORMA NTC 550 NÚCLEOS EXTRAÍDOS NORMA NTC 3658**	**MUESTRAS ESTÁNDAR ELABORADAS NORMA NTC 550 NÚCLEOS EXTRAÍDOS NORMA NTC 3658**	**MUESTRAS ESTÁNDAR ELABORADAS NORMA NTC 550 NÚCLEOS EXTRAÍDOS NORMA NTC 3658**
NORMATIVA QUE ESTANDARIZA EL MÉTODO	**NO** ESTA NORMALIZADO EL MÉTODO	**SI** ESTA NORMALIZADO EL MÉTODO NORMA NTC 504	**SI** ESTA NORMALIZADO EL MÉTODO NORMA NTC 3708
OBJETIVO DEL REFRENTADO	El objetivo del refrentado es obtener superficies planas y paralelas de acuerdo con los estándares NTC y ASTM	El objetivo del refrentado es obtener superficies planas y paralelas de acuerdo con los estándares NTC y ASTM	El objetivo del refrentado es obtener superficies planas y paralelas de acuerdo con los estándares NTC y ASTM
TOLERANCIAS NTC 673	**Planitud:** La tolerancia máxima en la planicidad de las superficies de soporte de carga potencial (los extremos (caras) de los especímenes) es 0.050 mm. **Perpendicularidad:** La desviación de perpendicularidad del lado, con referencia a los extremos (caras) es 0,5°.	**Planitud:** La tolerancia máxima en la planicidad de las superficies de soporte de carga potencial (los extremos (caras) de los especímenes) es 0.050 mm. **Perpendicularidad:** La desviación de perpendicularidad del lado, con referencia a los extremos (caras) es 0,5°.	**Planitud:** La tolerancia máxima en la planicidad de las superficies de soporte de carga potencial (los extremos (caras) de los especímenes) es 0.050 mm. **Perpendicularidad:** La desviación de perpendicularidad del lado, con referencia a los extremos (caras) es 0,5°.

TIPO DE REFRENTADO	PULIMENTO	AZUFRE	NEOPRENO
	MUESTRAS ESTÁNDAR ELABORADAS NORMA NTC 550 NÚCLEOS EXTRAÍDOS NORMA NTC 3658	**MUESTRAS ESTÁNDAR ELABORADAS NORMA NTC 550 NÚCLEOS EXTRAÍDOS NORMA NTC 3658**	**MUESTRAS ESTÁNDAR ELABORADAS NORMA NTC 550 NÚCLEOS EXTRAÍDOS NORMA NTC 3658**
EQUIPAMIENTO REQUERIDO	Máquina de pulimento para la preparación de especímenes cilíndricos o núcleos de concreto Sistema de recirculación de agua	Campana de extracción de gases. Olla eléctrica digital para fundir azufre rango de temperatura 128°. Molde para refrentado con azufre. Mascarilla para protección contra gases, guantes y gafas de seguridad.	Platos de retención en acero
SUMINISTROS / RENDIMIENTOS	Disco para pulir / 1000 usos	Azufre x 1 kg / 10 cilindros por las dos caras.	Un juego (2 unidades) de almohadillas de neopreno de 13 ± 2 mm de espesor/ 100 usos
COSTO REFRENTADO CILINDROS DE 4" X 8" / OFERTA	Mayor costo. Menor oferta.	Menor costo. Alta oferta.	Menor costo. Alta oferta.
TIEMPO REQUERIDO PARA REFRENTAR UN CILINDRO DE 4" X 8"	Menor tiempo Mayor optimización del proceso.	Mayor tiempo Menor optimización del proceso.	Menor tiempo Mayor optimización del proceso.
CONSIDERACIONES DE CALIDAD DE LOS MATERIALES DE REFRENTADO	NO APLICA.	Previo al refrentado se debe verificar la resistencia del azufre.	Previo al refrentado se debe verificar la dureza de las almohadillas de neopreno. Verificar los requisitos dimensionales de las almohadillas de neopreno.
CONSIDERACIONES DE CALIDAD DE LA SUPERFICIE	Rugosidad Ondulaciones Sobresaltos Depresiones	Porosidad Rugosidad Capa delgada o gruesa Descascaramiento Desportillamiento Depresiones	Resistencia del neopreno Desgaste del neopreno Perdida de resistencia Daños por flexión
IMPACTO AMBIENTAL	Adquirir maquinaria con componentes reciclables. Asegurar la correcta disposición de la maquinaria y sus componentes.	Compuestos gaseosos con base de azufre provocan la lluvia acida o el calentamiento global. Daños a la salud a largo plazo por exposición prolongada.	La fabricación de neopreno es altamente contaminante y emite grandes cantidades de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero.
AFECTACIONES A LA MUESTRA	**No** se imprimen cambios por agentes externos ni cambios en su composición original	**Si** se imprime un agente gravante (azufre) en el concreto.	**Si** se imprime un agente externo películas adhesivas (neopreno) en el concreto.

TIPO DE REFRENTADO	PULIMENTO	AZUFRE	NEOPRENO
	MUESTRAS ESTÁNDAR ELABORADAS NORMA NTC 550 NÚCLEOS EXTRAÍDOS NORMA NTC 3658	**MUESTRAS ESTÁNDAR ELABORADAS NORMA NTC 550 NÚCLEOS EXTRAÍDOS NORMA NTC 3658**	**MUESTRAS ESTÁNDAR ELABORADAS NORMA NTC 550 NÚCLEOS EXTRAÍDOS NORMA NTC 3658**
LIMITACIONES	Verificar el desgaste del disco de pulir. De acuerdo con el fabricante, el uso máximo del disco de pulido es de 1000 pasadas.	Evaluar y tomar las medidas de seguridad necesarias para la ejecución del refrentado con mortero de azufre. Monitorear la resistencia del material de refrentado como morteros hidráulicos o azufre de acuerdo con la norma NTC 504 2020, cementos. Determinación de resistencia de morteros de cemento hidráulico a la compresión, usando cubos de 50 mm o 2” de lado.	Verificar la dureza y resistencia de los materiales para que cumplan con lo requerido por la normativa De acuerdo con la normativa el uso máximo de cada almohadilla de neopreno es de 100 usos. El refrentado no adherido no puede ser utilizado para resistencias por debajo de 10 MPa ni superiores a 80 MPa. Evaluar y tomar las medidas de seguridad necesarias ya que los cilindros ensayados con refrentado no adherido, específicamente con almohadillas de neopreno, estallan violentamente.

Fuente. Elaboración propia

La guía metodológica para el pulimento de especímenes de concreto contiene el equipo requerido y el procedimiento recomendado para su aplicación, el presente trabajo presenta los lineamientos que se deben reproducir para lograr la repetitividad y obtener resultados confiables.

2.1 Objetivos

Los objetivos se establecen como parte integral del planteamiento de problema (Creswell & Creswell, 2018; Hernández, 2014; Ñaupas, 2014) respondiendo a la necesidad de implementar un refrentado optimo en el ensayo de resistencia a compresión de especímenes cilíndricos de concreto.

2.1.1 Objetivo General

Proponer una guía metodológica para la implementación del pulido como método de refrentado no adherido en pruebas de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto.

2.1.2 Objetivos Específicos

- ✓ Comparar los resultados de resistencia a la compresión de cilindros de concreto refrentados por pulimento y cilindros refrentados por otros métodos adheridos y no adheridos.
- ✓ Determinar la relación entre los diferentes métodos de refrentado de las superficies de carga de los especímenes de concreto cilíndricos y la variación en los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión.
- ✓ Definir las ventajas del pulimento de las superficies de carga de especímenes cilíndricos de concreto frente a otros métodos adheridos y no adheridos.

2.2 Antecedentes

En 1982, el Consejo de Investigación de Carreteras y Transporte de Virginia (Virginia Highway & Transportation Research Council) (Ozyildirim, H. C.,1982) investigaron la factibilidad del uso de almohadillas de neopreno confinadas por tapas de acero en vez del uso de capas de mortero de azufre como método de refrentado en el ensayo de resistencia a la compresión en cilindros de concreto. Encontraron que no hay diferencias significativas desde el punto de vista de la ingeniería entre los resultados de

las pruebas realizadas en cilindros probados con almohadillas de neopreno y cilindros refrentados con mortero de azufre. Aunque se obtuvo una diferencia entre los dos métodos trabajados de 0.01 en el nivel de significancia, y la desviación estándar de los refrentados con almohadilla de neopreno fueron más bajos que la de los cilindros refrentados con mortero de azufre, el promedio de todas las pruebas con almohadilla de neopreno fue de 55 PSI (379 kPa) más bajo que el promedio de los cilindros refrentados con mortero de azufre.

Gesoğlu, M., et al. (2002) investigaron el uso de refrentados adheridos: pasta de cemento pura y mortero de azufre; y no adherido: almohadilla de neopreno, en ensayos de cilindros de concreto de muy alta resistencia, y encontraron que el uso de pasta de cemento pura y la almohadilla de neopreno produjeron resistencias a la compresión promedio aproximada de 1% a 5% más altas que las obtenidas con el refrentado con mortero de azufre, independiente de la relación agua/material cementante. Concluyeron que, dentro de un análisis de varianza de los resultados, la resistencia a la compresión promedio general de los especímenes refrentados con pasta de cemento pura, almohadilla de neopreno y mortero de azufre no fueron significativamente diferentes.

Park, Y. S., & Suh, J. K. en 2008 estudiaron la efectividad del uso de mortero de azufre, almohadilla de neopreno y capa de arena como métodos de refrentado en cilindros de concreto de normal y alta resistencia en el ensayo de resistencia a la compresión. Encontraron que la desviación estándar y la dispersión de los resultados de esta resistencia fue muy alta para los especímenes refrentados con azufre y neopreno, generando una baja precisión y confiabilidad, comparado con refrentados con una capa de arena. Esto fue más notorio para aquellos cilindros con mayores resistencias

esperadas, además que los resultados de resistencia a la compresión promedio fueron mayores para el grupo de especímenes con la capa de arena.

Por su parte, Dumitru, I., et al. (2016) estudiaron los efectos de cuatro métodos de refrentado en cilindros de concreto entre 45 MPa y 110 MPa en el ensayo de resistencia a la compresión: mortero de azufre, almohadilla de neopreno, pulimento de una cara y pulimento de ambas caras del espécimen. Concluyeron que los cilindros de concreto refrentados por medio del pulido de una y ambas caras arrojaron valores de resistencia a la compresión bastante constante para todos los grados de resistencia. Estos presentaron un valor de coeficiente de variación por debajo de 2.1 % y 1.6 % respectivamente. En contraste, los cilindros a los cuales se les aplicó el método del mortero de azufre arrojaron valores de coeficientes de variación entre 2.1 % y 3.1 %, y aquellos con almohadilla de neopreno alcanzaron coeficientes de 3.3% para cilindros con concreto de 60 MPa, y 6.5 % para aquellos con 110 MPa. En cuanto a los valores alcanzados de resistencia a la compresión, los cilindros de concreto de 45 MPa no presentaron una diferencia significativa entre el mortero de azufre, la pasta de cemento y el método de pulido por una y ambas caras. Sin embargo, para resistencias más altas, los cilindros pulidos por una y ambas caras presentaron alrededor de 1 % y 3 % una resistencia a la compresión más alta que la de los cilindros refrentados con mortero de azufre. Los especímenes refrentados con almohadilla de neopreno presentaron aproximadamente un 2 % y un 7 % menos de resistencia a la compresión promedio para concretos de 60 MPa y 110 MPa, respectivamente. Los autores no recomiendan el uso de almohadilla de neopreno cuando el grado del concreto está entre 60 MPa y 110 MPa.

Por su parte, Rodriguez, D. F, en. (2018) estudio la influencia del tipo de refrentado en ensayos de compresión axial de cilindros de concreto de alta resistencia, para lo que

utilizo tres diseños de mezcla de 4.000 PSI, 6.000 PSI y 8.000 PSI, con dos bachadas por cada diseño, denominados concreto A, B, C, D, E y F, elaboro de cada mezcla 30 especímenes cilíndricos de concreto de 100 mm x 200mm y distribuyo los 30 especímenes en 4 tipos de refrentado, 7 especímenes pulidos, 7 con neopreno,7 pulidos por una cara y usando neopreno por el otro y 7 con azufre, de cada tipo de mezcla dejo 2 cilindros como testigos, el autor concluye que para concretos de baja resistencia el tipo de refrentado no influye de manera significativa en los promedio de los resultados de compresión axial, , sin embargo, en concretos de alta resistencia el tipo de refrentado si afecta directamente los resultados del ensayo y se debe tener en cuenta en el momento de decidir que tipo de refrentado utilizar, el neopreno presenta los menores rangos de dispersión seguido del pulido y el pulido +neopreno, el capinado con azufre
presenta los mayores rangos de dispersión. También evidencia que a mayor resistencia mayor es el rango entre valores máximos y mínimos para todos los refrentados estudiados.

3. Marco Teórico

3.1 Normativa

Tal como se menciona en el resumen, la normativa colombiana vigente en la que se enmarca el presente trabajo es una adopción modificada (MOD) de las normas ASTM C31/C31M:2019, *Practice for Making an curing Concrete Test Specimens in the Field;* y ASTM C39/C39M:2021, *Standard Test Method for Compressive Strenght of Cylindrical Concrete Specimens*; que derivan respectivamente en las normas técnicas colombianas NTC 550 Concretos. Elaboración y curado de especímenes de concreto en el sitio de trabajo; y NTC 673 (cuarta actualización) Concretos. Método de ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto. Así mismo se toma como referencia la NTC 1377 *Concretos*. Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos en el laboratorio.

En cuanto al proceso de refrentado se toman como referencia las normas técnicas: NTC 504 Concretos. Refrentado de especímenes cilíndricos de concreto; y NTC 3708 Concretos. Uso de refrentado no adherido para la determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto endurecido.

3.2 Tipos de refrentado

El refrentado de especímenes cilíndricos de concreto se contempla en las normas técnicas colombianas NTC 504 y NTC 3708. Este procedimiento consiste en proporcionar superficies planas en los extremos de los cilindros de concreto, de manera que resulten paralelos entre sí, distribuyendo de manera uniforme la carga aplicada en el ensayo de resistencia a compresión simple. De esta manera se disminuye la posibilidad de concentración de cargas y, por consiguiente, la posibilidad de errores en los resultados de resistencia a compresión.

En la **Figura 3-1** se presentan los tres tipos de refrentado estudiados a saber: refrentado por pulimento (P), refrentados con mortero de azufre (A) y refrentado con almohadilla de neopreno y anillos de retención (N):

Figura 3-1: Tipos de refrentado objeto de estudio

Fuente: Elaboración propia

El refrentado es el procedimiento realizado en una probeta de ensayo sobre un material por ejemplo mortero u hormigón para lograr una superficie plana, se destina a

corregir los defectos de planeidad y paralelismo entre las caras con el fin de obtener la mejor coincidencia posible con las piezas de apoyo y carga de la prensa de ensayo y una distribución uniforme de esfuerzos durante la aplicación de la carga. (Construmatica, 2009)

Bajo la normativa vigente en Colombia se contemplan dos tipos de refrentado; refrentado adherido, el cual se especifica en la NTC 504 (refrentado de especímenes de concreto), proceso que puede realizarse con “cemento con yeso y morteros de azufre, para los cuales se establece un primer requisito de tener igual o mayor resistencia que el concreto en el que van a ser utilizados” (Rodríguez, 2020).

Por otro lado, la NTC 3708 (Uso de refrentado no adherido para la determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto) establece los lineamientos para el refrentado no adherido para el ensayo a compresión de especímenes cilíndricos elaborados acorde a la norma NTC550 o NTC 1377. En esta norma se especifica que este tipo de refrentado no puede ser utilizado para pruebas en concretos con una resistencia menor a 10 MPa ni superior a 80 MPa.

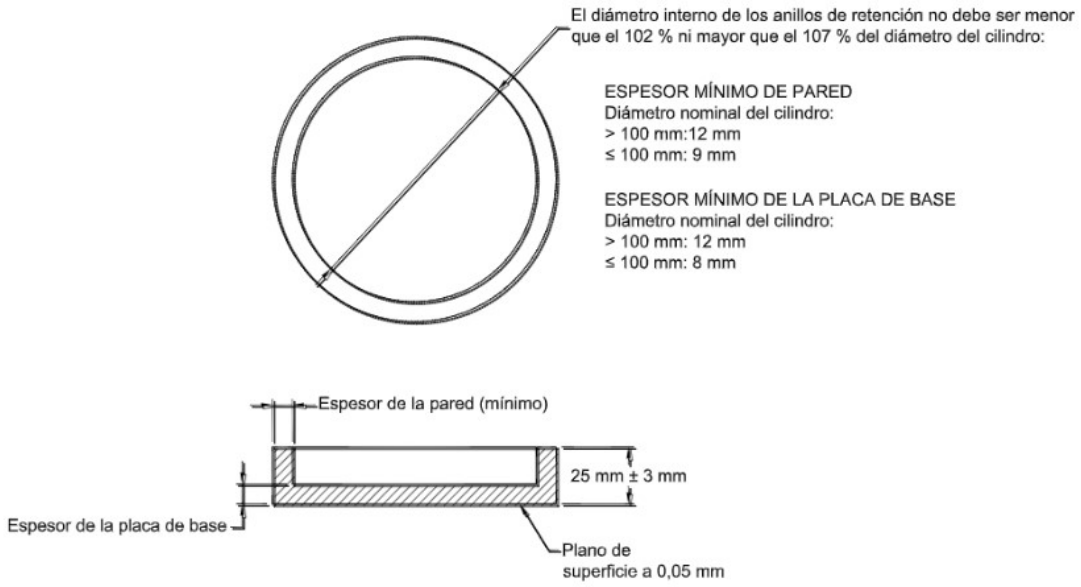
En concordancia con el objetivo de este trabajo es importante resaltar que la normativa colombiana NTC 3708 es una adopción modificada de las normas ASTM C1231/C1231M-15; y que en ambas normativas se profundiza en el proceso de refrentado mediante el uso de almohadillas elastoméricas, dejando de lado procedimientos como el refrentado por pulido.

3.2.1 Refrentado no adherido: almohadilla de neopreno

Tal como lo consigna la NTC 3708 el refrentado no adherido con el sistema de almohadillas elastoméricas consiste en la adaptación de almohadillas, generalmente de policloropreno (neopreno), con un espesor de 13 mm ± 2 mm y un diámetro que no sea inferior en 2mm al diámetro interno del anillo de retención.

Los anillos de retención son accesorios metálicos que sostienen y alinean las almohadillas elastoméricas con las caras de los extremos de los cilindros que recibirán la carga. La **Figura 3-2** muestra las especificaciones de la placa base y el anillo de retención, así como sus espesores y tolerancias.

Figura 3-2: Especificaciones técnicas de anillos de retención y placa base



Fuente. Tomado de Ejemplo de anillo de retención y plato de base, de ICONTEC, 2019, NTC 3708.

El refrentado con almohadillas de neopreno también se ha usado en estudios en los que se someten unidades de mampostería y muretes a falla por compresión, donde los resultados muestran evidencia de que la falla del material sometido a compresión puede presentarse con mayor violencia. En el apartado 3.3 del presente capítulo se presentarán los esquemas de modelos de fracturas típicos en los especímenes cilíndricos de concreto.

En el momento de ejecutar los ensayos a compresión en los muretes en la máquina universal, las fallas en las muestras no fueron comunes debido a que el material utilizado para refrentar (neopreno) acumula el esfuerzo y al transmitirlo a los muretes estos fallan de una forma repentina y explosiva. (González & Torres, 2011).

Así mismo la NTC 3708 hace referencia a que “los cilindros de concreto que se ensayan con refrentado no adherido se rompen más violentamente que los cilindros comparables con refrentado adherido” (ICONTEC, 2019).

Por otro lado, tanto las almohadillas de neopreno como de otros materiales elastoméricos deben cumplir con la resistencia y dureza que aparecen en la tabla 3-1. Así mismo, esta tabla contempla el número de usos consecutivos máximos al que se puede someter a las almohadillas.

Tabla 3-1: Especificaciones para el uso de almohadillas de neopreno

Resistencia a la compresión,[A] MPa	Dureza de durómetro Tipo A	Ensayos de calificación requeridos	Usos consecutivos máximos
Menos de 10		No permitido	
10 a 40	50	Ninguno	100
17 a 50	60	Ninguno	100
28 a 50	70	Ninguno	100
50 a 80	70	Requerido	50
Superior a 80		No permitido	
[A] La resistencia a la compresión del concreto al momento del ensayo según se especifica en los documentos del contrato. Para ensayos de aceptación, esta es la resistencia a la compresión especificada, f'_c.			

Fuente. Tomado de Requisitos para el uso de almohadillas de policloropreno (neopreno), de ICONTEC, 2019, NTC 3708.

Como se evidencia en la **Tabla 3-1**, las almohadillas de neopreno o materiales similares pueden someterse a un gran número de usos consecutivos. De igual manera los anillos de retención comparten esta ventaja siendo un consumible con una vida útil de mayor duración en comparación a los consumibles del refrentado adherido por mortero de azufre.

Existe una reducción de costos en este método de refrentado en relación con el refrentado con azufre, ya que se necesitan dos discos metálicos que sus usos son prácticamente indefinidos y placas de neopreno las cuales pueden llegar a utilizarse hasta cien veces. (Quilambaqui Montaño, 2013)

3.2.2 Refrentado adherido: mortero de azufre

El refrentado adherido contempla procedimientos de adhesión de materiales como el cemento puro, pasta de yeso de alta resistencia o mortero de azufre; sobre las caras que recibirán la carga durante la prueba a compresión simple.

Para el refrentado con cemento puro y con pasta de yeso de alta resistencia se debe realizar el procedimiento con “una placa de vidrio de mínimo 6 milímetros de espesor; una placa metálica maquinada de mínimo 11 milímetros de espesor o una placa de granito o diabasa pulida de mínimo 75 milímetros de espesor” (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2021c). Así mismo, el refrentado con mortero de azufre requiere de placas con condiciones similares, con superficies libres de hendiduras, ranuras o muescas.

Durante el proceso de refrentado se debe utilizar dispositivos que garanticen la alineación de las caras a rectificar, evitando desviaciones mayores a 0,5° perpendicularmente respecto al eje del espécimen cilíndrico.

La resistencia de los materiales para refrentado y el espesor de este deben cumplir con los requisitos indicados en la **Tabla 3-2**. (ICONTEC,2021c).

Tabla 3-2: Resistencia a la compresión y espesor máximo de los materiales de refrentado

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CILINDRO, MPA	RESISTENCIA MÍNIMA DEL MATERIAL DE REFRENTADO	ESPESOR MÁXIMO PROMEDIO DEL REFRENTADO	ESPESOR MÁXIMO EN CUALQUIER PARTE DEL REFRENTADO
3,5 a 50	35 MPa o la resistencia del cilindro, lo que sea mayor	6 mm	8 mm
Más de 50	Resistencia a la compresión no menor a la resistencia del cilindro, excepto según	3 mm	5 mm

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CILINDRO, MPA	RESISTENCIA MÍNIMA DEL MATERIAL DE REFRENTADO	ESPESOR MÁXIMO PROMEDIO DEL REFRENTADO	ESPESOR MÁXIMO EN CUALQUIER PARTE DEL REFRENTADO
	se indica en el numeral 5.1.1.		

Fuente. Tomada de Resistencia a la compresión y espesor máximo de los materiales de refrentado, de ICONTEC, 2021c, NTC 504.

Tal como lo advierte la NTC 504, el refrentado de mortero de azufre requiere de una examinación periódica para verificar la posible presencia de bolsas de aire o vapor que se hayan podido generar durante el proceso de refrentado. Adicionalmente, la norma advierte que durante el refrentado con mortero de azufre se puede producir gas de sulfuro de hidrógeno, el cual puede producir afectaciones en la salud, y en concentraciones altas puede llegar a ser letal.

Al respecto González y Torres (2011) mencionan que “Está comprobado que el manejo del azufre es perjudicial para la salud ya que se presentan problemas de quemaduras, contaminación, asfixia por inhalación, etc.” (p. 8).

El uso del azufre presenta problemas que deben tenerse en consideración en el manejo cuidadoso que requiere esta práctica, como son: quemaduras, inhalación, contaminación, corrosión de partes metálicas, y electrónicas de los equipos cercanos al lugar de ensayo, debido a que el gas que produce el azufre en conjunto con la humedad higroscópica produce ácido sulfúrico. (Quilambaqui, 2013)

3.2.3 Refrentado no adherido con máquina para pulido de concreto

Si bien en la norma NTC 3708, siendo una adopción modificada de la norma ASTM C1231/C1231M-15, se menciona el refrentado no adherido por pulimento para especímenes cilíndricos obtenidos acorde a la NTC 550 y NTC 1377; o núcleos de

acuerdo con la NTC 3658; en ninguna de las normativas mencionadas se especifica un método o se da una guía que explique el procedimiento, materiales y equipos necesarios para realizar este tipo de refrentado.

Por otro lado, encontramos referencias a otras normativas que especifican detalladamente el procedimiento de refrentado por pulido. El caso más cercano es la norma brasileña ABNT NBR 5738 donde el refrentado por pulimento se define de la siguiente manera:

Consiste en retirar, por medios mecánicos, una fina capa de material de las bases a preparar. Esta operación se suele realizar en máquinas especialmente adaptadas para este fin, utilizando herramientas abrasivas. El esmerilado debe llevarse a cabo de tal manera que asegure la integridad estructural de las capas adyacentes a la capa removida y proporcione una superficie lisa libre de ondulaciones y protuberancias. Se debe utilizar un dispositivo auxiliar que garantice la perpendicularidad de la superficie obtenida con la generatriz de la probeta. (Associação Brasileira de Normas Técnicas [ABNT], 2015)

Al respecto varios autores comentan que el refrentado por pulimento puede ser una alternativa útil en los casos en que las especificaciones de resistencia de los especímenes de concreto a ensayar, tratados por otros métodos de refrentado, muestran desviaciones significativas en los resultados.

El método de cortar y esmerilar el extremo de un cilindro se emplea en la prueba de compresión de hormigón de alta resistencia, porque la prueba de resistencia a la compresión por métodos convencionales de tipo adherido utilizando un tapón con mortero de azufre, mortero de alta resistencia o yeso de alta resistencia ha mostrado

relativamente los valores más pequeños poco fiables de la resistencia a la compresión. (Park & Suh, 2008)

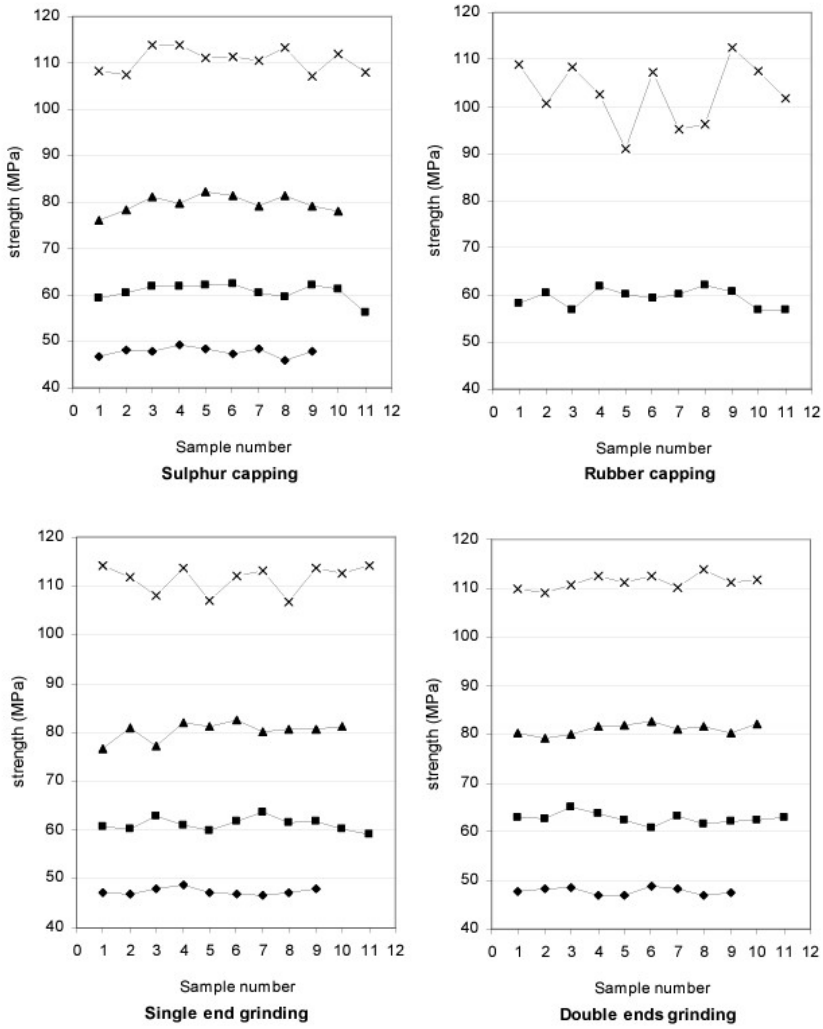
Tal como citan Lerner et al. (2020), para los concretos convencionales la técnica de refrentado mediante esmerilado mecánico fue más eficiente, mientras que los hormigones de alta resistencia no presentaron variación significativa entre los tratamientos mediante recubrimiento con lámina de neopreno y esmerilado superficial (Chies et al., 2014; Ehrenbring et al., 2019).

En el mismo documento Lerner et al. (2020) citan a Souza & Bastos (2017) quienes

"encontraron que las muestras de concreto alcanzaron una desviación estándar más baja tanto para CC como para HSC" (p. 161); y a Silva et al. (2011) y Silva et al. (2017) quienes "identificaron que nivelar la superficie superior en una rectificadora de especímenes aumenta la confiabilidad ya que produce coeficientes de variación más pequeños entre los resultados" (p. 161).

Si revisamos los resultados de la dispersión del valor de la fuerza individual en el trabajo de Dumitru et al. (2016), *Compressive Strength of Concrete Cylinders by Sulphur, Rubber Capping and Grinding Methods*, podemos observar que "los cilindros de hormigón con método de rectificado de doble extremo dieron una resistencia a la compresión bastante constante para todos los grados de resistencia". La **Figura 3-3** muestra los resultados mencionados sobre la dispersión del valor de la resistencia individual de especímenes cilíndricos tratados con diferentes tipos de refrentado.

Figura 3-3: Resultados de la resistencia individual de especímenes cilíndricos tratados con diferentes tipos de refrentado



Fuente. Tomado de Dispersión del valor de la fuerza individual, (p. 4) Dumitru et al, 2016.

Finalmente cabe resaltar que, en términos de sostenibilidad, el refrentado no adherido por pulimento se presenta como un método novedoso, que integrándose de manera óptima como un procedimiento de refrentado normalizado, puede generar ventajas en lo que respecta al uso de consumibles, inversión en maquinaria elaborada

con materiales reciclables y de larga vida útil, sin embargo, el análisis financiero no es alcance de este trabajo de grado.

3.3 Ensayo de compresión

El ensayo de compresión está regulado por la NTC 673 siendo una adopción modificada de la norma ASTM C39/C39M-21. Este método de ensayo se realiza con el propósito de determinar la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto y núcleos extraídos.

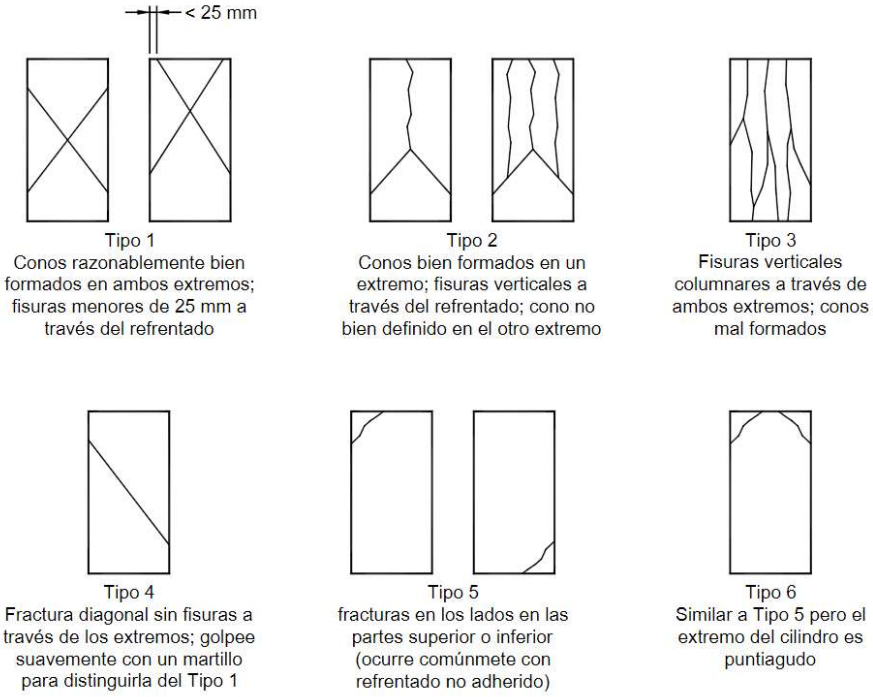
Este método de ensayo consiste en aplicar una carga axial de compresión de los cilindros moldeados o a núcleos, a una tasa que se encuentra dentro de un rango prescrito hasta que ocurra la falla. La resistencia a la compresión de un espécimen se calcula dividiendo la carga máxima alcanzada durante el ensayo por el área de la sección transversal del espécimen. (ICONTEC, 2021b).

El ensayo de compresión se usa para tener un control de la calidad de los concretos, así como para tener control sobre las dosificaciones y diferentes tipos de mezcla; el uso de aditivos; y para evaluar el cumplimiento de las especificaciones del concreto.

Al someter las muestras cilíndricas de concreto a compresión la carga se debe aplicar paulatinamente hasta que el espécimen muestre una fractura bien definida y el indicador de carga muestre que la carga está decreciendo constantemente, en particular la máquina debe detenerse en el momento en que la carga haya caído por debajo del 95% de la carga máxima. (ICONTEC, 2021b).

La **Figura 3-4** muestra los diferentes tipos de falla que de pueden presentar durante la prueba de compresión.

Figura 3-4: Tipos de falla



Fuente. Tomado de *Esquema de los patrones de fractura típicos* de ICONTEC, 2021b, NTC 673.

4. Desarrollo metodológico del proyecto

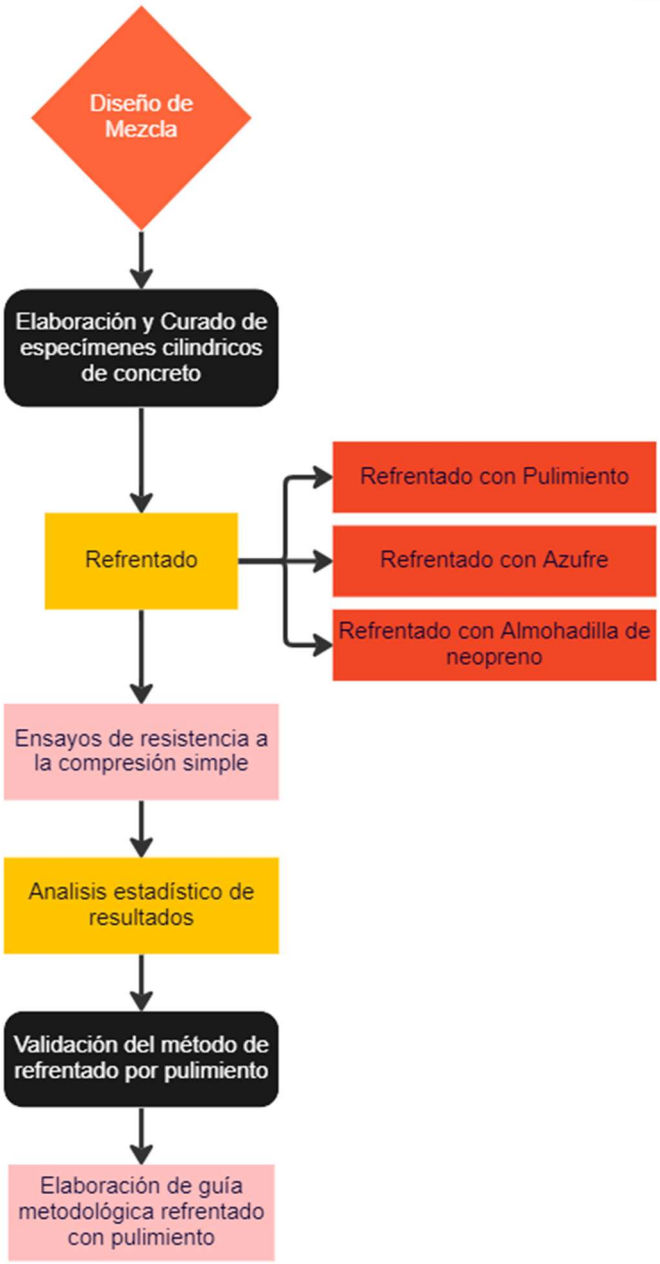
Para el desarrollo metodológico es primordial la validación del método de ensayo, mediante este proceso se establece que el desempeño analítico del método cumple los requisitos esperados para su uso., los organismos normalizadores requieren evidencia de que los métodos son capaces de producir resultados válidos. La validación del método se realiza debido a que es novedoso y no se ha caracterizado previamente, la estimación de la precisión se realiza calculando la desviación estándar y la varianza de los resultados obtenidos en las pruebas realizadas. Otro método para la posterior revisión o validación del método se puede realizar con ensayos interlaboratorios, los que se usan para poner a prueba el desempeño de un método en diferentes laboratorios.

La precisión del método se mide bajo las condiciones de repetitividad, teniendo un solo analista en un solo laboratorio con un solo conjunto de equipos para preparar las muestras de un material con baja homogeneidad. También es posible realizar la medida de la precisión en condiciones de reproducibilidad teniendo varios analistas en diferentes laboratorios.

Para hacer posible la repetitividad y reproducibilidad del método propuesto, se verifico previamente que los equipos utilizados y el personal capacitado estén disponibles en nuestro medio.

En el diagrama de flujo a continuación se presenta la metodología llevada a cabo para la verificación del método de ensayo que conlleva finalmente al planteamiento de una guía metodológica para su repetitividad y reproducibilidad bajo las premisas expuestas.

Figura 4-1: Desarrollo metodológico



Fuente: Elaboración propia

4.1 Diseño de mezcla

CEMEX COLOMBIA aportó el suministro y diseño de la mezcla de concreto, así como la elaboración de los especímenes cilíndricos, en la **Tabla 4-1** se presentan los componentes, su origen y la cantidad que se utilizó de cada uno para una mezcla de 1 m^3 de concreto con una resistencia de diseño de 3000 PSI o 20.1 MPa.

Tabla 4-1:: Diseño de mezcla

MATERIAL	ORIGEN	CANTIDAD	UNIDAD
Cemento ART	CEMEX	284.84	kg
Plastificante	CEMEX	1246.16	ml
Superplastificante	CEMEX	880.41	ml
Estabilizador de fraguado	CEMEX	403.08	ml
Agua	Acueducto	186.74	l
Grava 1”	Agregados el Cajón	863.87	kg
Arena	Corame	1022.39	kg

Fuente: CEMEX COLOMBIA

4.1.1 Agua

El agua utilizada para la elaboración de la mezcla de concreto fue tomada del acueducto, para este caso se utilizó agua del acueducto del municipio de Tocancipá ya que la mezcla fue elaborada en la planta de Cemex de este municipio, se cumple con los estándares de la norma NTC 3459 Concretos, agua para la elaboración de concretos.

Para la elaboración de 1 m^3 de concreto se utilizaron 186.74 litros de agua.

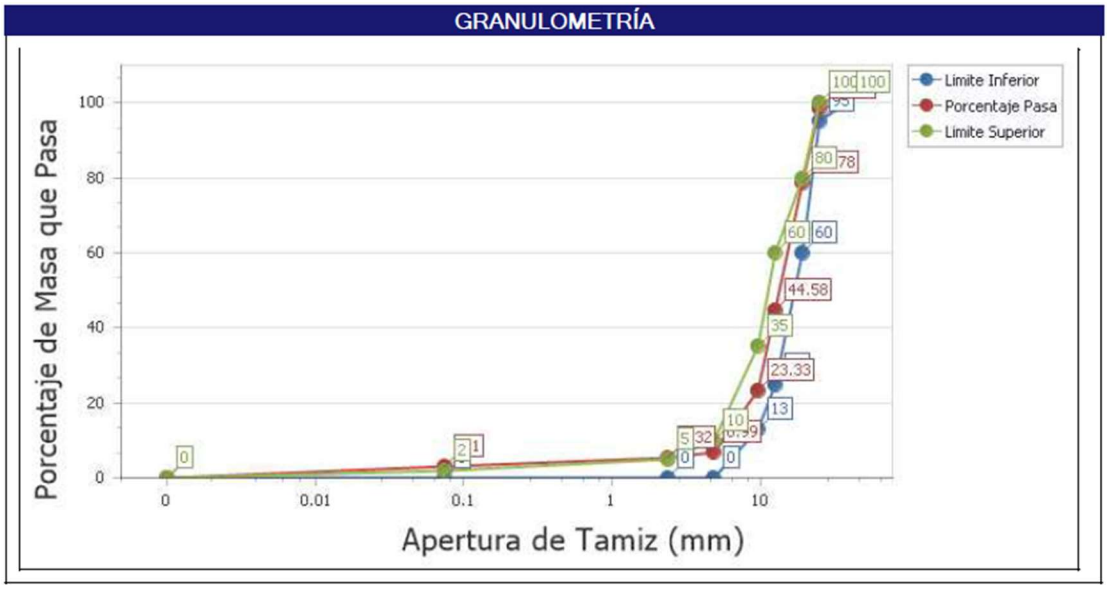
4.1.2 Grava

Las gravas utilizadas para la elaboración de la mezcla de concreto provienen de la empresa agregados el Cajón, el tamaño máximo de agregado es de 25.4 mm (1 pulgada), en **Figura 4-2**, se presenta la granulometría realizada por CEMEX. El ensayo

de granulometría se realizó bajo el estándar de la norma ASTM D422 Características físicas de los agregados, con el objetivo de verificar el cumplimiento de los tamaños de las gravas, como se puede observar la curva granulométrica del material se encuentra dentro de los límites mínimo y máximo tolerables, lo que se traduce en la correcta gradación del material.

Para la elaboración de 1 m^3 de concreto se utilizaron 863.87 kilogramos de agregados.

Figura 4-2: Granulometría gravas agregados el Cajón



Fuente: CEMEX COLOMBIA

Los resultados del ensayo de granulometría de las gravas se presentan en el Anexo A. Ensayos de Laboratorio

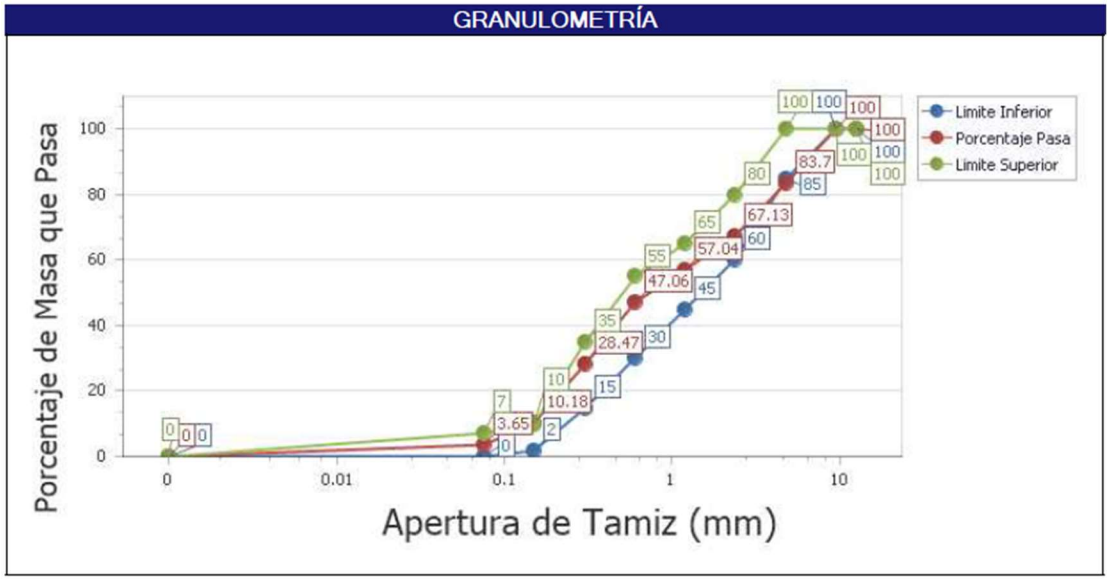
4.1.3 Arena

La arena utilizada para la elaboración de la mezcla de concreto proviene de la empresa Corame, en la **Figura 4-3**, se presenta la granulometría realizada por CEMEX.

El ensayo de granulometría se realizó bajo el estándar de la norma ASTM D422 Características físicas de los agregados, con el objetivo de verificar el cumplimiento de los tamaños de las arenas, como se puede observar la curva granulométrica del material se encuentra dentro de los límites mínimo y máximo tolerables, lo que se traduce en la correcta gradación del material.

Para la elaboración de 1 m^3 de concreto se utilizaron 1022.39 kilogramos de arena.

Figura 4-3: Granulometría arenas Corame



Fuente: CEMEX COLOMBIA

Los resultados del ensayo de granulometría de las arenas se presentan en el Anexo A. Ensayos de Laboratorio

4.1.4 Cemento hidráulico

El cemento utilizado para la elaboración de la mezcla de concreto es de la marca CEMEX, específicamente cemento hidráulico tipo ART (alta resistencia temprana), en el

Anexo A del presente trabajo se presenta el reporte de calidad número STR-ART-43-2022, suministrado por el fabricante, el reporte presenta la evaluación de los parámetros mecánicos y físicos del cemento fabricado durante el periodo comprendido entre el 17 al 23 de octubre de 2022, periodo de fabricación del cemento utilizado para la mezcla con la cual se elaboraron las probetas cilíndricas que son objeto de análisis del presente trabajo.

En la **Tabla 4-2** y **Tabla 4-3**, se presenta el resumen de los resultados del reporte de calidad.

Parámetros Mecánicos:

Tabla 4-2: Parámetros Mecánicos

PARÁMETRO	MÉTODO DE ENSAYO	TIEMPO	RESULTADO (MPa)
Resistencia a la Compresión	NTC 220	1 días	21.9
		3 días	30.9
		7 días	35.2
		28 días	44.7

Fuente: Elaboración propia

Parámetros Físicos:

Tabla 4-3: Parámetros Físicos

PARÁMETRO	METODO DE ENSAYO	RESULTADOS	UNIDADES
Retenido en Tamiz 45 µm	NTC 294	0.6	%
Superficie Específica Blaine	NTC 33	532	m²/kg
Tiempo de Fraguado Final	NTC 118	183	min
Tiempo de Fraguado Inicial	NTC 118	105	min
Cambio de Longitud por Autoclave	NTC 107	0.05	%
Contenido de Aire en Mortero	NTC 224	3.1	%
Expansión de Barra de Mortero a 14 días	NTC 4927	0.007	%

Fuente: Elaboración propia

4.1.5 Aditivos

Plastificante Isoplast 157, permite reducir el agua y confiere plasticidad y manejabilidad al concreto, para la elaboración de 1 m^3 de concreto se utilizaron 1246.16 mililitros de plastificante y sus principales características se presentan en la **Tabla 4-4**.

Tabla 4-4: Características Isoplast 157

PROPIEDAD	INSTRUMENTO	RESULTADOS
Apariencia	Cualitativo	Café oscuro
Densidad (g/mL)	Picnómetro Hidrómetro	1.10 – 1.14
pH	Potenciómetro	5.0 - 6.0

Fuente: Ficha técnica del producto trascrita por el autor

Otro aditivo utilizado es el superplastificante Isoflow 751. Permite una reducción de agua del 15% al 25%, con esta reducción de agua incrementa la resistencia de concreto y aporta retención en la manejabilidad, para la elaboración de 1 m^3 de concreto se utilizaron 880.41 mililitros de superplastificante y sus principales características se presentan en la **Tabla 4-5**.

Tabla 4-5: Características Isoflow 751

PROPIEDAD	INSTRUMENTO	RESULTADOS
Apariencia	Cualitativo	Café claro
Densidad (g/mL)	Picnómetro Hidrómetro	1.08 – 1.12
pH	Potenciómetro	5.0 – 7.0

Fuente: Ficha técnica del producto trascrita por el autor

Por último, se usó el aditivo estabilizador de fraguado Isoretard 212 que reduce la segregación al evitar adicionar agua adicional e indebida por pérdida excesiva de trabajabilidad y proporciona un retardo controlado para permitir mejores tiempos de transportación, colocación y acabado, para la elaboración de 1 m^3 de concreto se

utilizaron 403.08 mililitros de estabilizador de fraguado y sus principales características se presentan en la **Tabla 4-6**.

Tabla 4-6: Características Isoretard 212

PROPIEDAD	INSTRUMENTO	RESULTADOS
Apariencia	Cualitativo	Café claro
Densidad (g/mL)	Picnómetro Hidrómetro	1.08 – 1.12
pH	Potenciómetro	5.0 – 7.0

Fuente: Ficha técnica del producto trascrita por el autor

4.2 Elaboración y curado de los especímenes cilíndricos de concreto

Para cumplir con el objetivo principal del presente trabajo, se elaboraron treinta muestras cilíndricas de concreto de una misma mezcla con una resistencia de diseño de 3000 PSI o 20.68 MPa, los cuales se refrentaron utilizando tres métodos a saber: refrentado por pulimento, por azufre y almohadillas de neopreno, posteriormente se realizó sobre estas el ensayo de resistencia a la compresión simple, se analizó la variabilidad de los resultados de los tres métodos para comprobar la equivalencia del método de refrentado por pulimento con el refrentado con azufre y con la almohadilla de neopreno, una vez validada la confiabilidad del método se redactó una guía metodológica para la correcta aplicación del refrentado por pulimento.

Con anterioridad a la elaboración de los especímenes cilíndricos de concreto, se realizó el ensayo de asentamiento de la mezcla utilizada, el ensayo se realizó siguiendo los lineamientos de la norma NTC 396 Concretos. Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto.

El ensayo de asentamiento es ampliamente utilizado para medir la consistencia del concreto en estado fresco, radica en medir la diferencia de altura entre un molde metálico estándar conocido como el cono de Abrams o cono Slump y la masa de concreto después que ha sido retirada del molde.

De acuerdo con la norma NTC 396 (2021), es posible que los asentamientos menores de ½ pulgada no sean adecuadamente plásticos y los asentamientos mayores de 9 pulgadas no sean adecuadamente cohesivos, así el ensayo es un indicador rápidamente verificable en obra previo a la colocación del concreto. Como se observa en la **Figura 4-4** el resultado de la prueba de asentamiento fue de 7 pulgadas, lo que indica que la consistencia de la mezcla está dentro del rango de aceptabilidad, la verificación de la consistencia y manejabilidad del concreto en estado fresco es importante debido a que una mala colocación lleva a que se presenten cavidades permanentes en el concreto endurecido afectando su resistencia y aumentando la permeabilidad que contribuye a la carbonatación del acero de refuerzo expuesto.

Figura 4-4: Toma del asentamiento de la mezcla en estado fresco

Fuente: Elaboración propia

La elaboración de los especímenes se realizó bajo los estándares de la Norma Técnica Colombiana NTC 550 Concretos. Elaboración y curado de especímenes de concreto en obra, se elaboraron en total treinta probetas Los requisitos para el método de compactación, tipo, tamaño del espécimen, número de capas de profundidad aproximadamente igual y numero de apisonamientos por capa se presentan en la **Tabla 4-7** y **Tabla 4-8**.

Tabla 4-7: Requisitos para el método de compactación

Asentamiento, mm	Método de compactación
> 75	Apisonamiento
25 a 75	Apisonamiento o vibración
< 25	Vibración

Fuente. Adaptada de la NTC 550, ICONTEC (2021), p. 8

Tabla 4-8: Requisitos de tamaño, tipo y moldeo por apisonamiento

Tipo y tamaño del espécimen, mm	Número de capas de profundidad aproximadamente igual	Número de apisonamientos por capa
Cilindros:		
100 x 200	2	25
150 x 300	3	25
225 x 450	4	50
Vigas:		
150 a 200	2	Véase el numeral 9.3
más de 200	3 o más profundidades iguales, cada una de las cuales no exceda 150 mm	Véase el numeral 9.3

Fuente. Adaptada de la NTC 550, ICONTEC (2021), p. 8

De acuerdo con la **Tabla 4-7** y teniendo en cuenta que el asentamiento de la mezcla fue > 75 mm, el método de comparación que se emplea es el apisonamiento, posteriormente con la **Tabla 4-8** se determina el tamaño del molde de los cilindros de 100 x 200 mm, el número de capas 2 y el número de apisonamientos por capa de 25.

En la **Figura 4-5** se presenta el registro fotográfico de la elaboración de las probetas cilíndricas de concreto por el personal experto de laboratorio de CEMEX COLOMBIA.

Figura 4-5: Elaboración de los especímenes cilíndricos de concreto

Fuente: Elaboración propia

Posterior a la elaboración de los especímenes de concreto se realizó el curado inicial de los mismos, almacenándolos en un ambiente húmedo con temperatura controlada entre los 16° C y 27 ° C, esto con el objetivo de impedir la perdida de humedad, hasta por 48 horas y al terminar el curado inicial se desmoldaron los cilindros y se almacenaron en un ambiente húmedo con temperatura controlada de 23° C ± 2° C.

El procedimiento de curado inicial y final de los cilindros de concreto se realizó teniendo en cuenta los requisitos de la Norma Técnica Colombiana NTC 550 Elaboración y curado de especímenes de concreto en obra. El curado se realizó en las instalaciones

de CEMEX durante 28 días, en la **Figura 4-6**, se presenta el registro fotográfico del tanque de curado.

Figura 4-6: Curado de cilindros

Fuente: Elaboración propia – tanques de curado planta CEMEX TOCANCIPÁ

4.3 Refrentado

El refrentado, indiferentemente del método utilizado, tiene por objetivo preparar las caras de los cilindros, cumpliendo con el requerimiento de planitud de la norma, para el caso de los refrentados por pulimento y por azufre debe tener en cuenta que “previo al ensayo, ningún extremo de los especímenes debe apartarse de la perpendicularidad a los ejes en más de 0.5°, aproximadamente equivalente a 1 mm en 100 mm” (NTC 376, 2021, p 19), posteriormente a la aplicación del refrentado con pulimento y azufre se verifico la planitud utilizando una escuadra esmerilada y una galga de 0.05 mm, colocando la escuadra sobre la superficie preparada se comprueba que la galga no pueda ser introducida entre el cilindro y la escuadra.

Por otra parte “si se usa refrentado no adherido verifique el alineamiento del espécimen después de la aplicación de la carga, pero antes de alcanzar el 10% de la resistencia prevista del espécimen. Compruebe que el eje del cilindro no se desvié de la vertical en más de 0.05° y que los extremos del cilindro estén centrados dentro de los platos de retención. Si el alineamiento del cilindro no cumple con estos requisitos, libere la carga y vuelva a centrar cuidadosamente el espécimen” (NTC 673, 2021, p 11)

Para realizar el ensayo de resistencia a la compresión se elaboraron un total de treinta especímenes cilíndricos de concreto, que fueron refrentados utilizando las tres metodologías descritas, posteriormente se verificaron las condiciones de planitud y alineamiento, las cantidades y tipología de refrentado se presentan en la **Tabla 4-9**.

Tabla 4-9: Cantidad de especímenes cilíndricos y tipología de refrentado.

RESISTENCIA ESPERADA	TIPO DE REFRENTADO	CANTIDAD DE ESPECÍMENES
3000 PSI / 20.68 MPa	Refrentado no adherido con pulimento	10
3000 PSI / 20.68 MPa	Refrentado adherido con azufre	10
3000 PSI / 20.68 MPa	Refrentado no adherido con almohadillas de neopreno	10
	TOTAL	**30**

Fuente. Elaboración propia

4.3.1 Refrentado con pulimento

El refrentado por el método de pulimento fue implementado por primera vez en Colombia para los ensayos de los concretos utilizados en la torre de Atrio, la cual está

localizada sobre la carrera 7 entre calles 26 y 28 en la ciudad de Bogotá, el pulimento como método de refrentado fue la alternativa elegida debido a que las resistencias del concreto superaban la resistencia de los neoprenos y azufres disponibles en el mercado.

Luego de realizar el pulido se procedió a verificar el cumplimiento de la planitud de la superficie, el procedimiento se repitió sobre los diez cilindros por ambas caras, es importante resaltar que la totalidad de los especímenes cumplieron la prueba de planitud para el refrentado con pulimento.

En la **Tabla 4-10** se describe el equipo necesario, consumibles y tiempos requeridos para llevar a cabo el método de refrentado con pulimento.

Figura 4-7: Máquina pulidora

Fuente: Fotografía de CONCRELAB 2022.

Figura 4-8: verificación de la planitud

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-10:Resumen equipo, consumibles y tiempo de refrentado con pulimento

EQUIPO	CONSUMIBLES	RENDIMIENTO	TIEMPO REQUERIDO PARA REFRENTAR 1 CILINDRO
Máquina de pulimento	Disco para pulir Agua	1 disco rinde 1000 pulidas	20 segundos

Fuente. Elaboración propia

4.3.2 Refrentado con azufre

El refrentado con azufre se realizó en las instalaciones del laboratorio GEOLAB INGENIERÍA Y LABORATORIO SAS, con este método se refrentaron diez especímenes cilíndricos por ambas caras, posteriormente se procedió a verificar que cumplieran con la planitud de la superficie, el procedimiento se repitió sobre los diez cilindros por ambas caras, es importante resaltar que la totalidad de los especímenes cumplieron la prueba de planitud.

En la **Tabla 4-11** se describe el equipo necesario, consumibles y tiempos requeridos para llevar a cabo el método de refrentado con azufre.

Figura 4-9: Equipo de laboratorio requerido

Fuente: Elaboración propia

Figura 4-10: Acabado refrentado azufre

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-11: Resumen equipo, consumibles y tiempo de refrentado con azufre

EQUIPO	CONSUMIBLES	RENDIMIENTO	TIEMPO REQUERIDO PARA REFRENTAR 1 CILINDRO
Campana de extracción de gases. Olla eléctrica digital para fundir azufre rango de temperatura 128°. Molde para refrentado con azufre. Mascarilla para protección contra gases, guantes y gafas de seguridad.	Azufre	1 kilo de azufre rinde para capinar 10 cilindros de 4” x 8” por ambas caras	10 minutos

Fuente. Elaboración propia

El tiempo requerido para el método de refrentado con azufre, requiere de un tiempo adicional de endurecimiento de mínimo 2 horas previo al ensayo.

4.3.3 Refrentado con almohadilla de neopreno

El refrentado con almohadilla de neopreno se realizó en las instalaciones del laboratorio GEOLAB INGENIERIA Y LABORATORIO SAS, con este método se refrentaron un total de 10 cilindros por ambas caras.

En la **Tabla 4-12** se describe el equipo necesario, consumibles y tiempos requeridos para llevar a cabo el método de refrentado con almohadillas de neopreno.

Figura 4-11: Equipo de laboratorio requerido refrentado no adherido (Econocap) y almohadilla de neopreno

Fuente: Elaboración propia

Figura 4-12: Posicionamiento platos de retención (Econocap) y almohadilla de neopreno

Fuente: Elaboración propia

El posicionamiento del refrentado no adherido se verifico durante la ejecución de los ensayos, es importante resaltar que no se presentaron desviaciones superiores al 0.5°, esta condición se atribuye a la correcta elaboración y acabado de los especímenes cilíndricos de concreto.

Tabla 4-12:resumen equipo, consumibles y tiempo refrentado con almohadilla de neopreno

EQUIPO	CONSUMIBLES	RENDIMIENTO	TIEMPO REQUERIDO PARA REFRENTAR 1 CILINDRO
Econocap (Platos de retención en acero)	Un juego (2 unidades) de almohadillas de neopreno de 13 ± 2 mm de espesor	Cada neopreno rinde 100 usos	10 segundos

Fuente. Elaboración propia

4.4 Ensayo de resistencia a la compresión simple

En la **Tabla 4-13** se presentan los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a la compresión simple, realizados sobre treinta especímenes cilíndricos distribuidos en muestras de diez especímenes cilíndricos por cada método de refrentado utilizado:

Tabla 4-13:Resistencia a la compresión en MPa

Resistencia a la Compresión en Mpa - Refrentado Método no Adherido con Pulimento									
22,70 MPa	21,30 MPa	23,10 MPa	22,50 MPa	21,60 MPa	21,20 MPa	21,80 MPa	22,90 MPa	23,40 MPa	21,30 MPa

Resistencia a la Compresión en Mpa - Refrentado Método no Adherido con Neopreno									
21,70 MPa	24,60 MPa	21,30 MPa	23,10 MPa	21,80 MPa	24,90 MPa	24,30 MPa	20,80 MPa	23,20 MPa	23,70 MPa

Resistencia a la Compresión en Mpa - Refrentado Método Adherido con Azufre									
22,50 MPa	24,10 MPa	25,00 MPa	23,50 MPa	21,50 MPa	21,00 MPa	22,80 MPa	19,70 MPa	20,80 MPa	21,50 MPa

Fuente. Elaboración propia

4.5 Validación del método de refrentado por pulimento

La validación del método de refrentado con pulimento tiene como objetivo comprobar que este sea repetible y reproducible para obtener los resultados esperados, para realizar esta validación se realizaron los ensayos de compresión sobre 30 especímenes cilíndricos refrentados con tres métodos (azufre, neopreno y pulido), los ensayos se realizaron en un ejercicio de repetitividad para verificar la desviación estándar y la varianza de los resultados llevó a cabo un análisis estadístico de varianzas (ANOVA) de los resultados del ensayo de compresión obtenidos. Para este análisis se verifico el cumplimiento de los supuestos de normalidad y de igualdad de varianzas.

El análisis de varianzas se realizó sobre los resultados de resistencia a la compresión obtenidos por los tres métodos de refrentado estudiados para determinar si difieren o no de manera significativa entre sí con un nivel de confianza del 95%, el ensayo de compresión se realizó bajo los lineamientos estandarizados de la norma NTC 673 (ICONTEC, 2021), los procedimientos para el refrentado se encuentran estandarizados para el refrentado con azufre y el refrentado con almohadillas de neopreno, sin embargo no existe un procedimiento estandarizado para realizar el refrentado mediante pulimento, para cumplir el objetivo de redactar la guía que contiene el procedimiento utilizado, la validación del método fue la base para comprobar la efectividad y repetitividad del mismo.

4.6 Análisis de resultados

Para realizar el análisis de varianza de los resultados (ANOVA), se utilizó el software Minitab, con este análisis se busca determinar estadísticamente si el método de

refrentado con pulimento arroja resultados para el ensayo de resistencia a compresión de cilindros de concreto cuyas varianzas no sean significativamente diferentes a los obtenidos con métodos normalizados, para este caso el refrentado con azufre y el uso de almohadillas de neopreno, o si por el contrario no se encuentran ninguna diferencia significativa.

Para realizar el análisis ANOVA es necesario identificar los datos atípicos, verificar que datos sigan una distribución normal y que las varianzas sean iguales.

Datos atípicos

Un valor atípico es una observación extrañamente grande o pequeña. Los valores atípicos pueden tener un efecto desproporcionado en los resultados estadísticos, como la media, lo que puede conducir a interpretaciones engañosas. (minitab, 2018)

Como primer paso se verifico la existencia o no de datos atípicos de los resultados del ensayo de resistencia a la compresión obtenidos con cada uno de los métodos de refrentados utilizados con un nivel de significancia de 5%. (Prueba de Grubbs).

Hipótesis nula: La hipótesis nula indica que todos los valores de los datos provienen de la misma distribución normal.

Hipótesis alterna: La hipótesis alternativa indica que el valor más pequeño o grande de los datos es un valor atípico.

A continuación, se realiza en análisis de valores atípicos utilizando un nivel de significancia de 5%.

Figura 4-13: Datos atípicos resistencia cilindros refrentados con Pulimento

HOJA DE TRABAJO 2

Prueba de valores atípicos: RESISTENCIA MPa R. PULIMIENTO

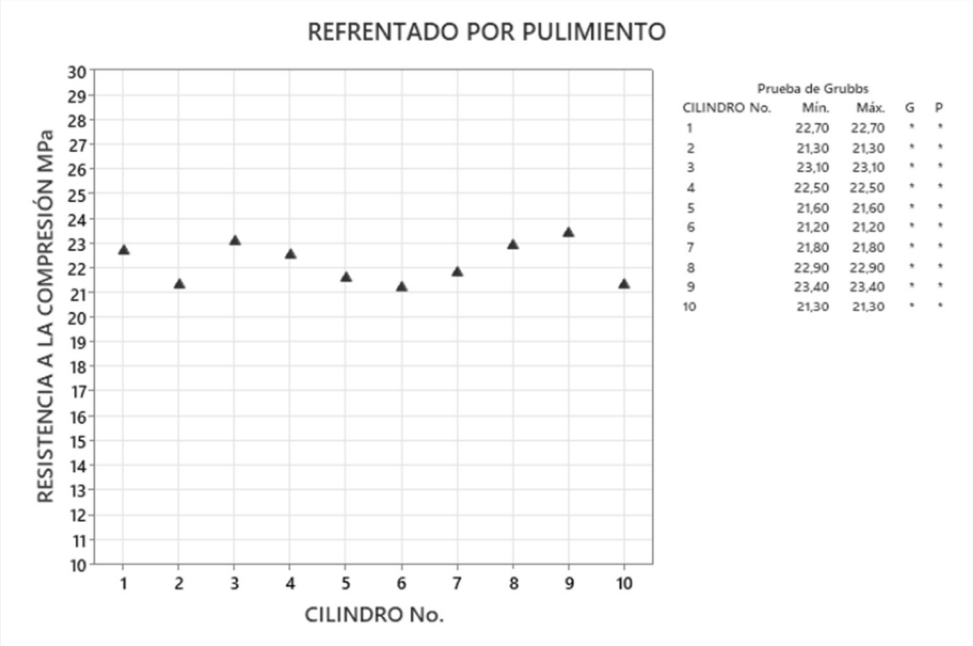
Método

Hipótesis nula	Todos los valores de los datos provienen de la misma población normal
Hipótesis alterna	El valor más pequeño o más grande de los datos es un valor atípico
Nivel de significancia	α = 0,05

Prueba de Grubbs

Variable	CILINDRO No.	N	Media	Desv.Est.	Mín.	Máx.	G	P
RESISTENCIA MPa R. PULIMIENTO	1	1	22,700	*	22,700	22,700	*	*
	2	1	21,300	*	21,300	21,300	*	*
	3	1	23,100	*	23,100	23,100	*	*
	4	1	22,500	*	22,500	22,500	*	*
	5	1	21,600	*	21,600	21,600	*	*
	6	1	21,200	*	21,200	21,200	*	*
	7	1	21,800	*	21,800	21,800	*	*
	8	1	22,900	*	22,900	22,900	*	*
	9	1	23, .00	*	23, .00	23, .00	*	*
	10	1	21,300	*	21,300	21,300	*	*

* . .O;A * No hi y valor atípico en ei nivel de signi.ici ncia de 5%



Fuente: Elaboración propia

Figura 4-14: Datos atípicos resistencia cilindros refrentados con Azufre

HOJA DE TRABAJO 3

Prueba de valores atípicos: RESISTENCIA MPa R. AZUFRE

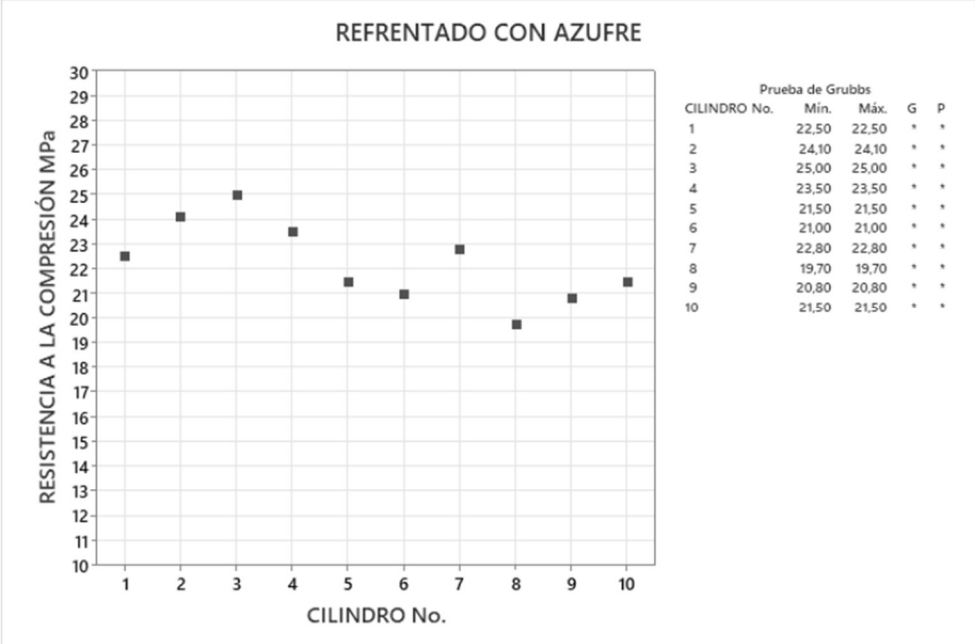
Método

Hipótesis nula	Todos los valores de los datos provienen de la misma población normal
Hipótesis alterna	El valor más pequeño o más grande de los datos es un valor atípico
Nivel de significancia	α = 0,05

Prueba de Grubbs

Variable	CILINDRO No.	N	Media	Desv.Est.	Mín.	Máx.	G	P
RESISTENCIA MPa R. AZUFRE	1	1	22,500	*	22,500	22,500	*	*
	2	1	24,100	*	24,100	24,100	*	*
	3	1	25,000	*	25,000	25,000	*	*
	4	1	23,500	*	23,500	23,500	*	*
	5	1	21,500	*	21,500	21,500	*	*
	6	1	21,000	*	21,000	21,000	*	*
	7	1	22,800	*	22,800	22,800	*	*
	8	1	19,700	*	19,700	19,700	*	*
	9	1	20,800	*	20,800	20,800	*	*
	10	1	21,500	*	21,500	21,500	*	*

* NOTA * No hay valor atípico en el nivel de significancia de 5%



Fuente: Elaboración propia

Figura 4-15:: Datos atípicos resistencia cilindros refrentados con Almohadilla de Neopreno

HOJA DE TRABAJO 4

Prueba de valores atípicos: RESISTENCIA MPa R. A. NEOPRENO

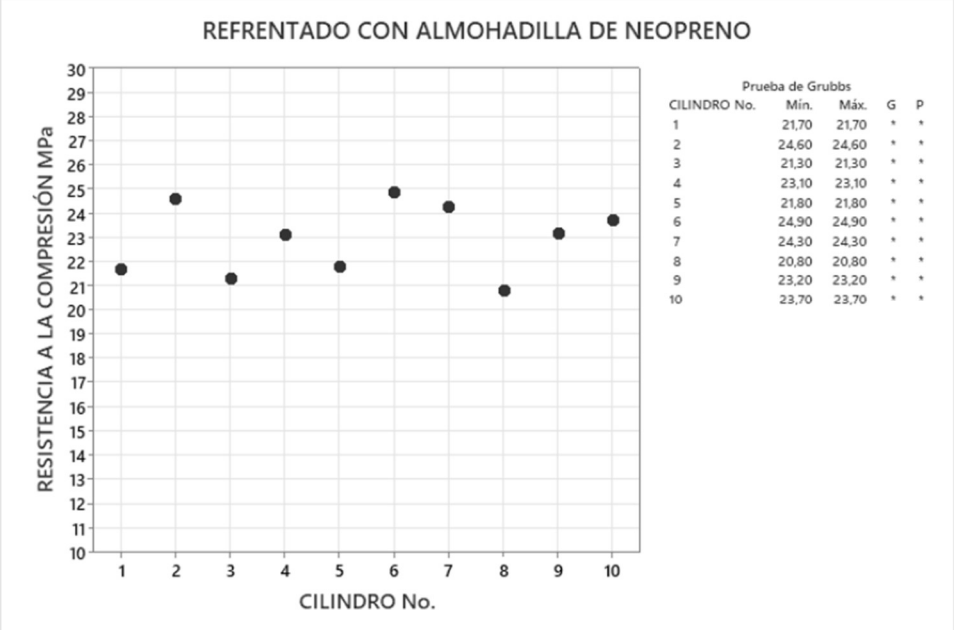
Método

Hipótesis nula	Todos los valores de los datos provienen de la misma población normal
Hipótesis alterna	El valor más pequeño o más grande de los datos es un valor atípico
Nivel de significancia	α = 0,05

Prueba de Grubbs

Variable	CILINDRO No.	N	Media	Desv.Est.	Mín.	Máx.	G	P
RESISTENCIA MPa R. A. NEOPRENO	1	1	21,700	*	21,700	21,700	*	*
	2	1	24,600	*	24,600	24,600	*	*
	3	1	21,300	*	21,300	21,300	*	*
	4	1	23,100	*	23,100	23,100	*	*
	5	1	21,800	*	21,800	21,800	*	*
	6	1	24,900	*	24,900	24,900	*	*
	7	1	24,300	*	24,300	24,300	*	*
	8	1	20,800	*	20,800	20,800	*	*
	9	1	23,200	*	23,200	23,200	*	*
	10	1	23,700	*	23,700	23,700	*	*

* NOTA ...o hay valor atí¸ ico en el ı.ivel de sign.fica.cia de 5 /o



Fuente: Elaboración propia

Del análisis de valores atípicos realizado podemos concluir que con un nivel de confianza de 95% no existen datos atípicos dentro de las muestras de datos.

Distribución normal

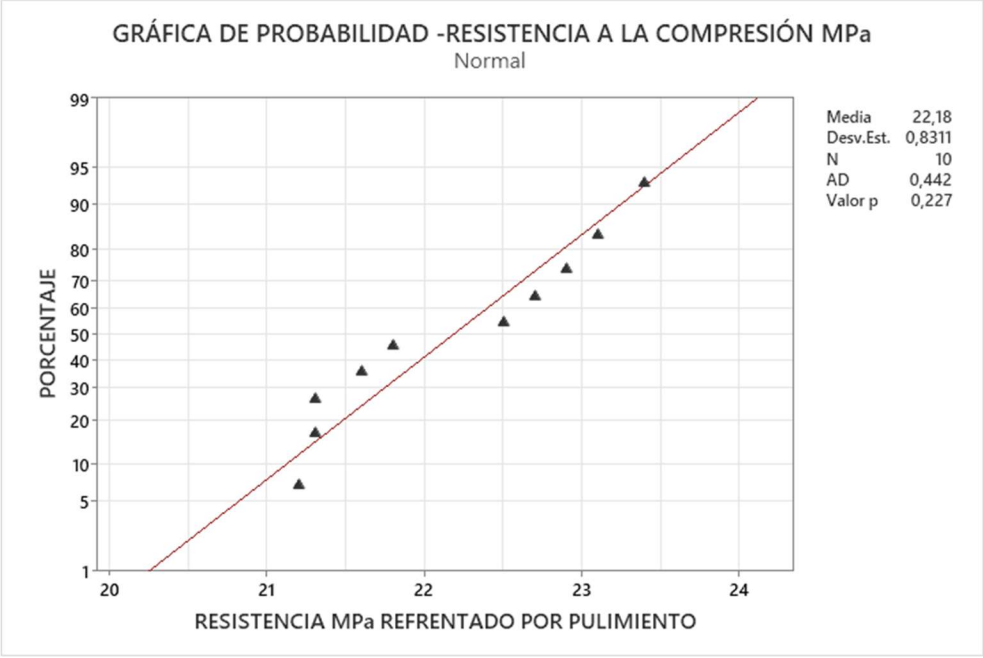
La distribución normal es una distribución continua que se especifica por la media (μ) y la desviación estándar (σ). La media es el pico o centro de la curva en forma de campana. La desviación estándar determina la dispersión de la distribución (Minitab, 2018)

Para una prueba de normalidad, las hipótesis son las siguientes:

H0: Los datos siguen una distribución normal.

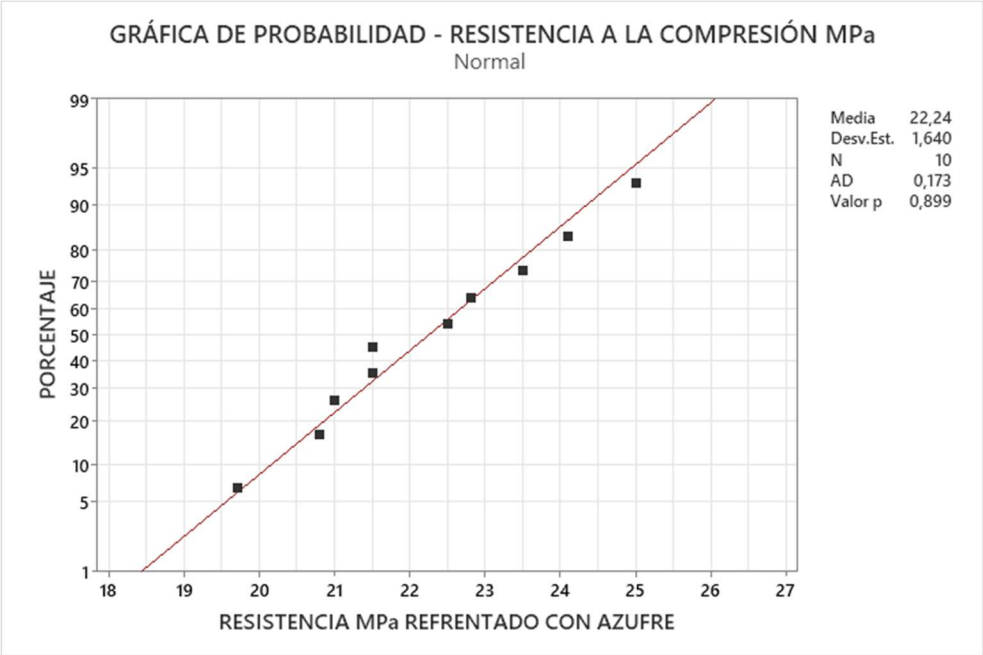
H1: Los datos no siguen una distribución normal.

Figura 4-16: Grafica de probabilidad refrentado con pulimento



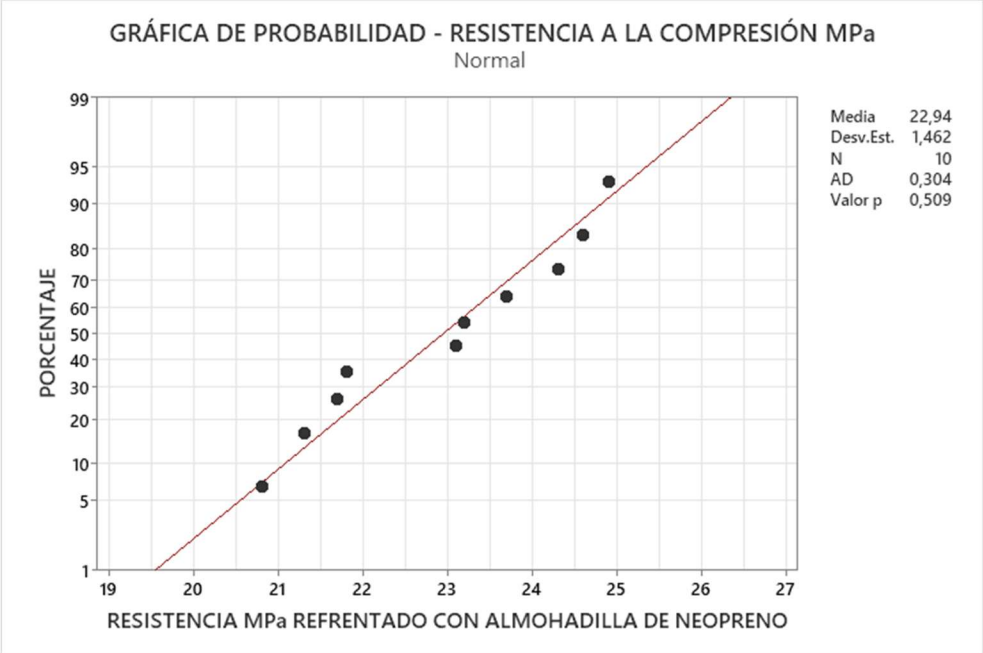
Fuente: Elaboración propia

Figura 4-17: Grafica de probabilidad refrentado con azufre



Fuente: Elaboración propia

Figura 4-18: Grafica de probabilidad refrentado con almohadilla de neopreno



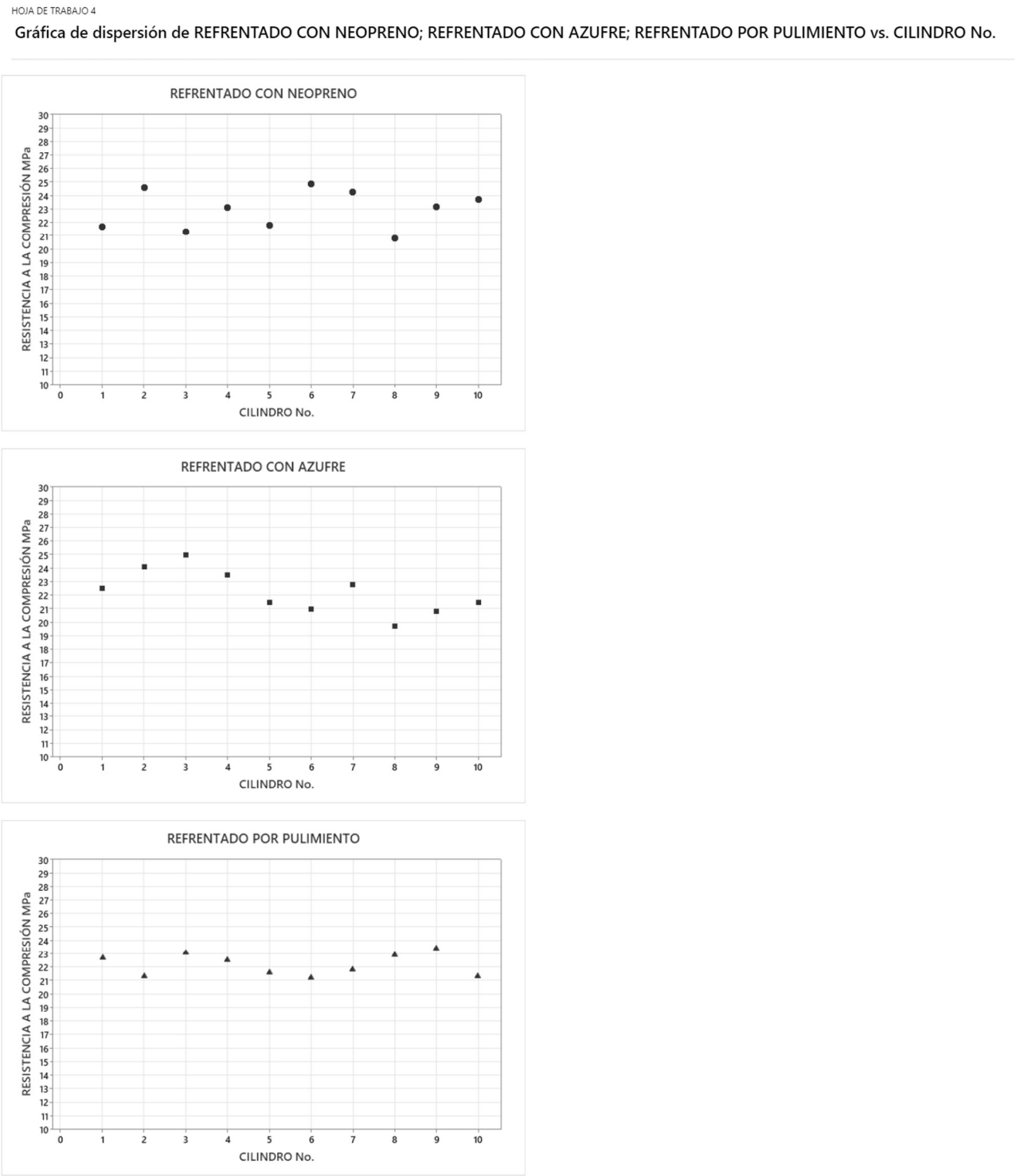
Fuente: Elaboración propia

El análisis de probabilidad realizado sobre los datos o resultados del ensayo de compresión realizado a las muestras refrentadas por los tres métodos estudiados, nos indica que los datos siguen una distribución normal con $p>0.05$.

Valores individuales

A continuación, se presenta en la **Figura 4-19** la gráfica de valores individuales, por cada método de refrentado se obtuvieron diez resultados de la resistencia a la compresión, en el eje axial se presenta el número de cilindro y en el eje vertical se representa el resultado del ensayo de resistencia en MPa, así podemos observar la dispersión que presenta cada método en los esquemas presentados con la misma escala.

Figura 4-19: Grafica de valores individuales – Resistencia a la compresión MPa



Fuente: Elaboración propia

Por último, se realiza la prueba de igualdad de varianzas ANOVA

Minitab muestra un estadístico de prueba y un valor p para la prueba de Levene.

H0: las varianzas son iguales

H1: las varianzas no son iguales.

El método de cálculo de la prueba de Levene es una modificación del procedimiento de Levene (Levene, 1960) desarrollado por Brown y Forsythe (1974). Este método considera las distancias de las observaciones con respecto a la mediana de la muestra en lugar de la media de la muestra. Al usar la mediana de la muestra en vez de la media de la muestra, esto hace que la prueba sea más sólida para las muestras más pequeñas. Si el valor p es menor que el nivel α, se rechaza la hipótesis nula de que las varianzas son iguales.

$$L = \frac{(N-k)\sum_{i=1}^{K} N_i(\overline{V}_i-\overline{V})^2}{(k-1)\sum_{i=1}^{K}\sum_{j=1}^{N_i}\left(V_{ij}-\overline{V}_i\right)^2}$$

Figura 4-1: Prueba de igualdad de varianzas ANOVA

HOJA DE TRABAJO 1

Prueba de igualdad de varianzas:

Método

Hipótesis nula	Todas las varianzas son iguales
Hipótesis alterna	Por lo menos una varianza es diferente
Nivel de significancia	α = 0,05

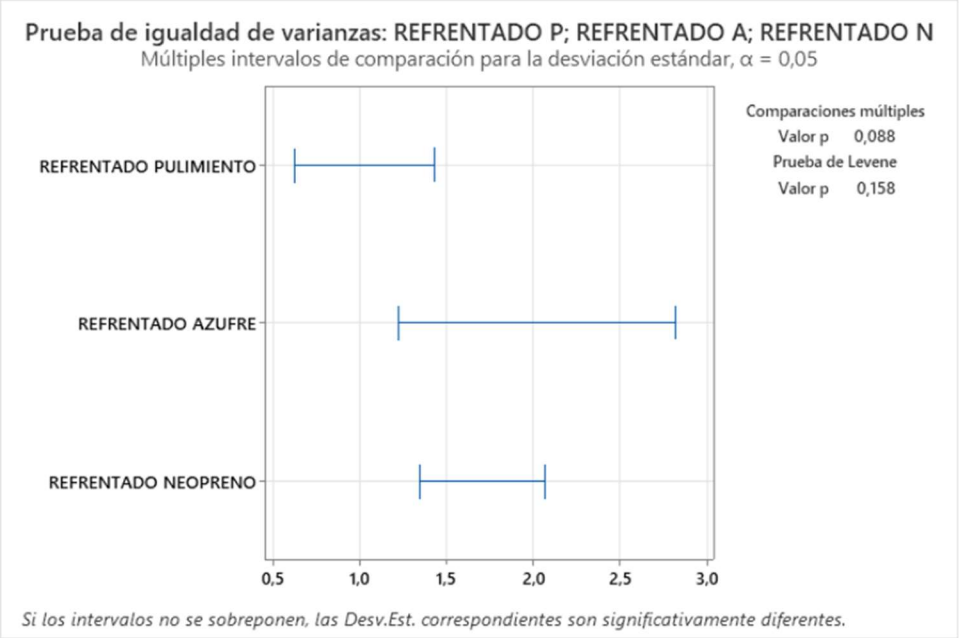
Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar

Muestra	N	Desv.Est.	IC
REFRENTADO PULIMIENTO	10	0,83106	(0,59915; 1,51558)
REFRENTADO AZUFRE	10	1,62399	(0,96871; 3,57943)
REFRENTADO NEOPRENO	10	1,46151	(1,02199; 2,74788)

Nivel de confianza individual = 98,3333%

Pruebas

Método	Estadística de prueba	Valor p
Comparaciones múltiples	—	0,088
Levene	1,98	0,158



Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 4-1** se muestra el resultado de la prueba de igualdad de varianzas, se avaluaron diez (10) resultados del ensayo de compresión simple para cada método de refrentado, el resultado obtenido es $p>0.05$, así se acepta la hipótesis nula y se concluye que las varianzas son iguales.

4.7 Guía metodológica aplicación de refrentado mediante pulimento de las superficies de carga para pruebas de resistencia a la compresión de muestras cilíndricas de concreto

4.7.1 Introducción

La presente guía se desarrolla partiendo de la necesidad de tener lineamientos para refrentar especímenes cilíndricos de concreto mediante pulimento, se presenta como una alternativa aplicable a un método que no tiene un procedimiento normalizado para su aplicación.

El procedimiento contenido en esta guía es un paso a paso básico para realizar el pulido de los especímenes cilíndricos de concreto, se presenta como una progresión lógica y expresa la sencillez del método ya que la actividad principal es desarrollada por la maquinaria empleada.

Los capítulos contenidos en esta guía se elaboraron partiendo de los presentados en las normas técnicas colombianas NTC.

4.7.2 Objeto

Esta guía metodológica abarca el procedimiento y equipo requerido para realizar el refrentado de especímenes cilíndricos de concreto con la aplicación de refrentado mediante pulimento de las caras para especímenes cilíndricos elaborados de acuerdo con la NTC 550 y núcleos extraídos de acuerdo con la norma NTC 3658.

El refrentado por pulimento se puede considerar un método no adherido ya que no imprime sobre la superficie de concreto ningún elemento ni compuesto diferente al de su composición original.

El refrentado por pulimento no presenta limitaciones en cuanto a la resistencia del material utilizado para el refrentado, las condiciones de resistencia del concreto utilizado ni las dimensiones de la probeta o del espécimen, la calidad de la superficie está relacionada directamente con el estado del disco para pulir, siempre que este se encuentre en óptimas condiciones de desgaste y no se haya excedido la cantidad de usos de acuerdo con las recomendaciones específicas dadas por cada fabricante se deben obtener los resultados esperados.

La presente guía no considera los posibles problemas de seguridad, si lo hay, es responsabilidad del usuario el uso de los implementos de seguridad y elementos de protección personal (EPP).

4.7.3 Campo de aplicación

La guía está dirigida a los laboratorios de calidad de materiales para la construcción, específicamente en el campo de calidad del concreto, para su aplicación

una consideración importante a tener en cuenta es el cálculo del sesgo de la medición, que es la diferencia entre el resultado obtenido para un mensurado y el verdadero valor de este, de esta forma un laboratorio que implemente el método deberá realizar pruebas para estimar el sesgo y demostrar la robustez de este, así se podrán defender los resultados obtenidos bajo su aplicación.

4.7.4 Referencias normativas utilizadas

Los siguientes documentos normativos referenciados en esta guía son indispensables para la aplicabilidad de esta.

NTC 550: 2020, Concretos. Elaboración y curado de especímenes cilíndricos de concreto en el sitio de trabajo.

NTC 504: 2021, Concretos. Refrentado de especímenes cilíndricos de concreto.

NTC 3708: 2019, Concretos. Uso de refrentado no adherido para la determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto endurecido.

NTC 673: 2021, Concretos. Método de ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto.

NTC 1377: 2021, Concretos. Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos de laboratorio.

NTC 3658: 2018, ingeniería civil y arquitectura. Método para la obtención y ensayo de núcleos extraídos y vigas de concreto aserradas.

4.7.5 Términos y definiciones

Definición de términos específicos de esta guía

Disco para pulir: disco para pulir concreto que sea compatible con la referencia del equipo que se utilice.

Refrentado no adherido: método para alisar las caras del espécimen cilíndrico de concreto sin imprimir elementos o compuestos sobre esta.

Precisión: carencia del acuerdo entre los resultados de un ensayo realizado en condiciones estipuladas.

Repetitividad: precisión en condiciones de repetitividad.

Reproducibilidad: Expresión cuantitativa de la variabilidad aleatoria asociada a diferentes mediciones de un mismo mensurado.

Mensurado: magnitud que se pretende medir

4.7.6 Importancia y uso

Esta guía describe el uso de refrentado no adherido por pulimento de las caras de los especímenes cilíndricos de concreto endurecido elaborados de acuerdo con la NTC 550 y núcleos extraídos de acuerdo con la norma NTC 3658, como método de refrentado alternativo a los descritos en las normas NTC 504 y NTC 3708.

El pulimento del cilindro proporciona la planitud de los extremos de los especímenes cilíndricos de concreto de acuerdo con los requerimientos de planitud y perpendicularidad de la normativa NTC 673.

4.7.7 Materiales y equipos

Máquina para pulir: la máquina de pulimento es automática y provee una rápida pulida de los extremos del espécimen cilíndrico para obtener superficies planas y paralelas que cumplen con los estándares de la normativa NTC 673.

La capacidad del equipo depende de la marca del diseño y la referencia particular.

Figura 4-2: Maquina para pulir especímenes cilíndricos de concreto

Fuente: Fotografía de la empresa CONCRELAB 2022.

Disco para pulir: el laboratorio debe registrar la fecha en que el disco de pulido fue puesto en servicio y el número de usos a los que ha sido sometido. El remplazo del disco de pulido se realizará cuando se cumplan los usos recomendados por el fabricante.

Suministro de agua: el refrigerado del disco de pulir requiere inyección constante de agua.

Regla esmerilada: se utiliza para verificar la perpendicularidad de los lados del cilindro con referencia a los extremos (caras); la máxima desviación es de 0.5°.

Galga de 0.05 mm: se utiliza para verificar la planitud de los extremos del cilindro (caras); la máxima desviación es de 0.05 mm.

4.7.8 Otras instalaciones

Se sugiere contar con un sedimentador, un filtro y una bomba para la recirculación del agua utilizada como refrigerante para el disco de pulir, adicionalmente con su uso se elimina la polución generada, llevando las partículas del material pulido al sedimentador y posteriormente las partículas que no se sedimentan son filtradas, así será posible recircular el agua requerida en el proceso y minimizar su consumo.

4.7.9 Especímenes de ensayo

Los especímenes deben ser elaborados de acuerdo con la norma NTC 550 o núcleos extraídos de acuerdo con la norma NTC 3658. Para su elaboración se debe considerar el entrenamiento del operario, procedimientos normativos, equipamiento e instalaciones requeridas.

4.7.10 Procedimiento:

- Posicione el espécimen cilíndrico en el equipo de pulimento
- Ponga en funcionamiento la máquina de pulimento.
- Una vez se finalice el ciclo de pulimento retire el espécimen.
- Verifique visualmente que no se presenten ondulaciones u otras imperfecciones considerables

- Si se observan imperfecciones a simple vista, realice nuevamente la rectificación de la superficie con la máquina de pulido.
- Si no observa imperfecciones detectables a la vista proceda con la verificación de planitud y perpendicularidad del espécimen como se indica a continuación:
    - **Planitud:** Con la galga de 0.05 mm verifique la planicidad de la cara del espécimen *"La tolerancia máxima en la planicidad de las superficies de soporte de carga potencial (los extremos (caras) de los especímenes) es de 0.050 mm".* En la imagen a continuación se presenta ilustrativamente como realizar la verificación:

Figura 4-20: verificación de la planitud

Fuente: CONCRELAB 2022.

- **Perpendicularidad:** utilizando la regla esmerilada verifique la perpendicularidad de los lados del cilindro con relación a las caras *"la tolerancia máxima de la desviación de perpendicularidad del lado, con referencia a los extremos (caras) es de 0,5°"* En la imagen a continuación se presenta ilustrativamente como realizar la verificación:

Figura 4-21: verificación de la perpendicularidad

Fuente: CONCRELAB 2022.

- Si la planitud medida con los instrumentos de precisión (galga y escuadra) no cumple con el estándar requerido en la norma NTC 673, realice una nueva rectificación del espécimen en la máquina de pulido.
- Repita el paso anterior hasta que la planitud cumpla con el requerimiento de la norma NTC 673.
- Complete el procedimiento de aplicación de la carga y los cálculos del ensayo de acuerdo con la norma NTC 673. Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto.

4.7.11 Conclusiones y recomendaciones finales

Es importante que el personal técnico que reproduzca el ensayo este capacitado.

Previo a la aplicación del pulimento se debe verificar que el laboratorio cuente con la infraestructura, maquinaria e instrumentos necesarios, que estos estén en óptimas condiciones de funcionamiento, calibrados y verificados.

Los resultados obtenidos con el método de ensayo propuesto en esta guía deberán ser reproducibles bajo las mismas condiciones por un analista en un laboratorio diferente.

5. Conclusiones

Para cumplir con los objetivos trazados se realizó el análisis de resultados del ensayo de compresión simple, realizado sobre treinta (30) especímenes cilíndricos de concreto, posteriormente se validó estadísticamente el método de refrentado por pulimento para verificar la confiabilidad de los resultados y hacer posible su repetitividad y reproducibilidad, la validación se realizó mediante un análisis de varianzas que determino que no existían varianzas estadísticamente significativas con un nivel de confiabilidad del 95%, luego de comprobar la validez del método y su equivalencia con los métodos de refrentado adherido con azufre y no adherido con neopreno, se redactó la guía metodológica que responde a la necesidad de orientación practica para su implementación.

Los métodos de refrentado no adherido con almohadilla de neopreno y refrentado adherido con azufre, luego de ser ampliamente validados cuentan con el procedimiento estandarizado por la normativa nacional para su reproducción, la validación del refrentado no adherido por pulimento arroja los resultados esperados. siempre que se tengan buenas prácticas de laboratorio, los equipos indicados, calibrados y el personal calificado el procedimiento plasmado en la guía metodológica redactada para el cumplimiento del objetivo general del presente trabajo debe arrojar buenos resultados.

Finalmente obtenemos las respuestas a las preguntas de investigación planteadas:

¿Cómo debe implementarse el pulido como método de refrentado no adherido en pruebas de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto para responder a la norma NTC 673?

Luego de realizar el pulimento de los especímenes en el equipo de pulido propiedad de la empresa CONCRELAB se verifico que el refrentado cumplía con los requerimientos de planitud establecidos en la norma NTC 673, posteriormente se validó el método y se redactó la guía metodológica para su repetitividad y reproducibilidad.

¿Puede el refrentado por pulimento disminuir la variación en los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión en especímenes cilíndricos?

De acuerdo con los resultados obtenidos del ensayo de compresión simple se validó que la variación de los resultados del ensayo disminuye en los cilindros con refrentado por pulimento en comparación con los resultados obtenidos con otros métodos de refrentado con azufre y almohadilla de neopreno.

¿Qué método de refrentado es óptimo para pruebas de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto?

Luego de realizar el refrentado por los tres métodos estudiados, se concluye que tanto el refrentado por pulimento, por azufre y utilizando almohadillas de neopreno son métodos con los cuales se obtienen los resultados esperados, hablando en términos de optimización el pulimento optimizo tiempo y recursos que hacen más sencillo el proceso para su implementación.

Bibliografía

American Society for Testing and Materials (2022). *Standard Guide for Validating Analytical Methods (ASTM E2857)*

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2015). *Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova (NBR 5738)*.

Chies, J., Rohden, A., & Silva Filho, L. C. (2014). Surface treatment of concrete test specimens subjected to compression. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais (ISSN 1983-4195)*, *7*, 775–787.

Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2018). *Research Design Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches* (5th ed.).

Dumitru, I., Song, T., Caprar, V., & Mukhing, V. (2016). *Compressive Strength of Concrete Cylinders by Sulphur, Rubber Capping and Grinding Methods*.

Ehrenbring, H. Z., de Medeiros Quinino, U. C., Silva Oliveira, L. F., & Fonseca Tutikian, B. (2019). Experimental method for investigation of impact of the addition of polymer fibers on drying shrinkage and cracking for concretes. In *https://onlinelibrary.wiley.com/journal/17517648*. Structural Concrete.

Gesoğlu, M., Güneyisi, E., & Özturan, T. (2002). Effects of end conditions on compressive strength and static elastic modulus of very high strength concrete. *Cement and Concrete Research ; Volume 32, Issue 10, Page 1545-1550 ; ISSN 0008-8846*. https://doi.org/10.1016/s0008-8846(02)00826-8

González, J. L., & Torres, J. M. (2011). Comparación de resultados entre refrentado de neopreno y yeso en unidades de mampostería y muretes fallados a compresión.

In *instname:Universidad Pontificia Bolivariana ; reponame:Repositorio Institucional de la Universidad Pontificia Bolivariana*. Universidad Pontificia Bolivariana.

Hernández, R., Baptista, M. del P., & Fernández, C. (2014). *Metodología de la investigación.* (Sexta Edic). McGraw Hill.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2018). *ingeniería civil y arquitectura. Método para la obtención y ensayo de núcleos extraídos y vigas de concreto aserradas. (NTC 3658)*.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2019). *Concretos. Uso de refrentado no adherido para la determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto endurecido (NTC 3708)*.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2020). *Concretos. Elaboración y curado de especímenes de concreto en el sitio de trabajo (NTC 550)*.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2021a). *Concretos. Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos en el laboratorio (NTC 1377)*.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2021b). *Concretos. Método de ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto (NTC 673)*.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2021c). *Concretos. Refrentado de especímenes cilíndricos de concreto (NTC 504)*.

Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., & Tanesi, J. (2004). *Diseño y control de mezclas de concreto.* Portland Cement Association.

Lara Peinado, F. (1986). *Código de Hammurabi.* [s.n.].

Lerner, L. R., Ott, M. J., Führ, L. M., Ehrenbring, H. Z., Pacheco, F., & Tutikian, B. F. (2020). *Influence of the molding process and different surface regularization*

methods on the compressive strength of concrete specimens. https://doi.org/10.7764/RDLC.19.1.159-169

Ñaupas, H., Mejía, E., Novoa, E., & Villagómez, A. (2014). *Metodología de la investigación: cuantitativa - cualitativa y redacción de la tesis.* (Cuarta edi). Ediciones de la U.

Ozyildirim, H. C. (1982). *Use of neoprene pads in testing concrete cylinders : final report.* (V. H. & T. R. Council, Ed.). https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/19014

Park, Y.-S., & Suh, J.-K. (2008). Comparative Study on Compressive Strenght of Concrete with New Sand-Cap and Neoprene Pad. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, *2*, 15–19.

Quilambaqui, J. A. (2013). *Incidencia del desgaste de las almohadillas no adherentes en el ensayo de compresión de cilindros de hormigón*.

Rodríguez, D. F. (2020). *Influencia del tipo de refrentado en ensayos de compresión axial de cilindros de concreto de alta resistencia*.

Sánchez de Guzmán, D. (2001). *Tecnología del concreto y del mortero.* (5a. edició).

A. Anexo: Informes de resultados ensayos de laboratorio