

TECNOLOGICO NACIONAL DE MEXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AGUASCALIENTES



TECNOLOGICO
NACIONAL DE MEXICO

**Ciencia y
Tecnología**

Secretaría de Ciencia, Humanidades,
Tecnología e Innovación



Instituto **Tecnológico**
de Aguascalientes

DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

**Simulación del comportamiento de la luz
difusa en pastas de cemento**

Tesis de Doctorado
Para obtener el título de:
Doctora en Ciencias de la Ingeniería

Presenta:

M.C. Mónica Cecilia Villalobos López

Director

Dr. Juan José Soto Bernal

Asesores

Dr. J. Ascensión Guerrero Viramontes
Dra. Iliana Rosales Candelas
Dr. José Ángel Ortiz Lozano
Dra. Gloria Verónica Vázquez García

Aguascalientes, Aguascalientes, junio de 2025.





Aguascalientes, Ags., **21/mayo/2025**

No. De Oficio: 0221/2025

Asunto: **Autorización de Tesis de Grado Para su Impresión**

M.C. MÓNICA CECILIA VILLALOBOS LÓPEZ
P R E S E N T E

Los abajo firmantes, Miembros del Jurado para Examen de Grado de Doctorado, hacemos **CONSTAR** que, habiendo revisado el Trabajo de Tesis desarrollado por Usted, bajo el título: "**SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA LUZ DIFUSA EN PASTAS DE CEMENTO**" hemos dictaminado que éste es de aceptarse, por lo que se autoriza su impresión.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
Ingenio, Cultura y Saber, que conducen a la Excelencia®

PRESIDENTE


DR. JUAN JOSÉ SOTO BERNAL

SECRETARIO


DR. J. ASCENCIÓN GUERRERO VIRAMONTES

VOCAL

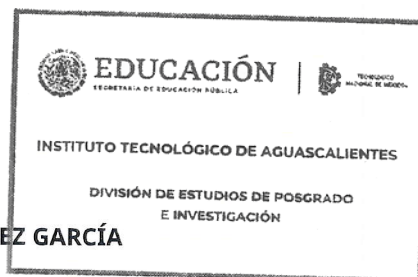

DRA. ILIANA ROSALES CANELAS

VOCAL


DR. JOSÉ ÁNGEL ORTIZ LOZANO

VOCAL


DRA. GLORIA VERÓNICA VÁZQUEZ GARCÍA



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Av. Adolfo López Mateos #1801. Fracc. Bona Gens
C.P. 20256 Aguascalientes, Ags. Tel. 449 910 5002 ext. 127
e-mail: jefatura.depi@aguascalientes.tecnm.mx
tecnm.mx | www.aguascalientes.tecnm.mx





Instituto Tecnológico de Aguascalientes
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Aguascalientes, Ags., **26/mayo/2025**
Asunto: Autorización de uso de derechos

VILLALOBOS LÓPEZ MÓNICA CECILIA, mayor de edad, con domicilio ubicado en canal interceptor, número 101 interior 8, san cayetano, 20010, Aguascalientes, Aguascalientes, en mi calidad de titular y autor de la tesis denominada **"SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA LUZ DIFUSA EN PASTAS DE CEMENTO"** quien para todos los fines del presente documento se denominará **EL AUTOR Y/O TITULAR**, suscribo el presente documento de autorización de uso de derechos patrimoniales de autor a favor del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes el cual se registrará por las cláusulas siguientes:

PRIMERA – AUTORIZACIÓN: **EL AUTOR Y/O TITULAR**, mediante el presente documento autoriza la utilización de los derechos patrimoniales de autor al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes, de la tesis denominada **"SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA LUZ DIFUSA EN PASTAS DE CEMENTO"**, a través del Repositorio Institucional del Tecnológico Nacional de México (en lo sucesivo TecNM) y en el Repositorio Nacional, que puede ser consultado en la liga electrónica: (www.repositorionacionalcti.mx/).

SEGUNDA – OBJETO: Por medio del presente escrito, **EL AUTOR Y/O TITULAR** autoriza al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes, a través del Repositorio Institucional del TecNM y en el Repositorio Nacional para que de conformidad con la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, use los derechos del documento antes referido, con fines exclusivamente académicos.

TERCERA – TERRITORIO: Los derechos aquí autorizados se dan sin limitación geográfica o territorial alguna.

CUARTA – ALCANCE: La presente autorización se da tanto para formato o soporte material, y se extiende a la utilización en medio óptico, magnético, electrónico, en red, mensajes de datos o similar conocido o por conocer, del ejemplar o número respectivo de la publicación.

QUINTA – EXCLUSIVIDAD: La autorización de uso aquí establecida no implica exclusividad en favor del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes. Por lo tanto, **EL AUTOR Y/O TITULAR** en su carácter de autor de la obra objeto del presente documento se reserva el derecho de publicar directamente, u otorgar a cualquier tercero, autorizaciones de uso similares o en los mismos términos aquí acordados.

SEXTA – DERECHOS MORALES (Créditos y mención): La Autorización de los derechos antes mencionados no implica la cesión de los derechos morales sobre los mismos por cuanto en conformidad con lo establecido en los artículos 18, 19, 20, 21, 22 y 23 de la Ley Federal de Derechos de Autor, dada la cuenta que estos derechos son inalienables, imprescriptibles, irrenunciables e inembargables. Por lo tanto, los mencionados derechos seguirán radicados en cabeza de **EL AUTOR Y/O TITULAR**, y siempre deberá mencionarse su nombre cuando se utilice la obra.

SÉPTIMA – AUTORÍA: **EL AUTOR Y/O TITULAR**, declara y ratifica que el material objeto de la presente fue realizada por él o por ella sin violar o usurpar derechos de Propiedad Intelectual de terceros.



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Av. Adolfo López Mateos #1801. Fracc. Bona Gens
C.P. 20256 Aguascalientes, Ags. Tel. 449 910 5002 ext. 127
e-mail: jefatura.depi@aguascalientes.tecnm.mx
tecnm.mx | www.aguascalientes.tecnm.mx





Instituto Tecnológico de Aguascalientes
División de Estudios de Posgrado e Investigación

ATENTAMENTE

*Excelencia en Educación Tecnológica®
Ingenio, Cultura y Saber, que conducen a la Excelencia*

Vo.Bo.

VILLALOBOS LÓPEZ MÓNICA CECILIA
AUTOR DE LA TESIS

DR. JUAN JOSÉ SOTO BERNAL
DIRECTOR DE LA TESIS

ccp. Archivo



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Av. Adolfo López Mateos #1801, Fracc. Bona Gens
C.P. 20256 Aguascalientes, Ags. Tel. 449 910 5002 ext. 127
e-mail: jefatura.depi@aguascalientes.tecnm.mx
tecnm.mx | www.aguascalientes.tecnm.mx



Instituto Tecnológico
de Aguascalientes





Instituto Tecnológico de Aguascalientes
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Aguascalientes, Ags., 26/mayo/2025
Asunto: Oficio de originalidad

**CLAUSTRO DOCTORAL
DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
PRESENTE**

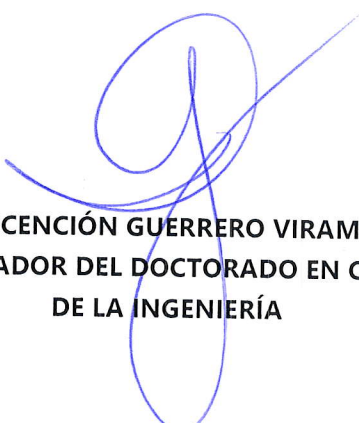
El director de tesis de el/la **VILLALOBOS LÓPEZ MÓNICA CECILIA** estudiante del **Doctorado en Ciencias de la Ingeniería** con número de control R20150507 hace constar que, después de haber realizado la revisión del informe de originalidad generado con la herramienta Turnitin, el trabajo "**SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA LUZ DIFUSA EN PASTAS DE CEMENTO**" es original conforme a los criterios establecidos. El porcentaje de similaridad es de 15 % y se adjunta resumen del reporte.

ATENTAMENTE

*Excelencia en Educación Tecnológica®
Ingenio, Cultura y Saber, que conducen a la Excelencia®*

Vo.Bo.


DR. JUAN JOSÉ SOTO BERNAL
DIRECTOR DE TESIS


DR. J. ASCENCIÓN GUERRERO VIRAMONTES
**COORDINADOR DEL DOCTORADO EN CIENCIAS
DE LA INGENIERÍA**

ccp. Archivo



2025
Año de
**La Mujer
Indígena**

Av. Adolfo López Mateos #1801. Fracc. Bona Gens
C.P. 20256 Aguascalientes, Ags. Tel. 449 910 5002 ext. 127
e-mail: jefatura.depi@aguascalientes.tecnm.mx
tecnm.mx | www.aguascalientes.tecnm.mx





Agradecimientos

La culminación de esta tesis representa no solo un logro académico, sino también un viaje lleno de aprendizajes y retos que no hubiera sido posible sin el apoyo incondicional de las personas más importantes en mi vida.

En primer lugar, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi esposo Víctor, quien ha sido mi roca y mi mayor fuente de apoyo. Gracias por estar a mi lado en cada paso de este camino, por alentarme en los momentos difíciles y por creer en mí incluso cuando yo dudaba. Tu amor y compromiso han sido fundamentales para que hoy pueda alcanzar esta meta. A mi hijo Leonardo, mi mayor inspiración, gracias por llenarme de energía y alegría incluso en los días más agotadores. Eres el motor que impulsa mis sueños y el recordatorio constante de por qué vale la pena esforzarse.

A mis padres Lula y Arturo, quienes desde el principio me inculcaron los valores del esfuerzo, la dedicación y el amor por el conocimiento. Gracias por brindarme una base sólida sobre la cual construir mis metas y por apoyarme en cada etapa de mi vida. Su sacrificio y amor son la razón por la que estoy aquí hoy.

También quiero agradecer profundamente a mi asesor de doctorado, Dr. Juan José Soto Bernal, por su guía y apoyo académico. Su experiencia, paciencia y orientación han sido clave en el desarrollo de este trabajo. Su confianza en mis capacidades y su compromiso con mi formación me han ayudado a crecer tanto profesional como personalmente. A todos ellos, les dedico este logro con un corazón lleno de gratitud. Sin ustedes, este sueño no habría sido posible. Agradezco al TecNM / Instituto Tecnológico de Aguascalientes y a la Secihti a través del apoyo 759117 por todo el soporte institucional brindado para la realización y conclusión de este proyecto doctoral.

Resumen

El cemento, en particular el cemento Portland, es un material clave en la construcción debido a su capacidad hidráulica. Este endurece al reaccionar con agua, lo que genera productos hidratados con resistencia mecánica. La tesis aborda temas como las propiedades fundamentales del cemento, su composición química, el proceso de fraguado, y las influencias externas (temperatura y humedad) en su comportamiento.

El trabajo utiliza herramientas avanzadas de simulación como Aspen Plus, COMSOL Multiphysics y HET²² para modelar procesos como:

1. **Química del cemento:** Se simulan las reacciones de hidratación durante el fraguado.
2. **Campos magnéticos y transferencia de calor:** Se analizan los efectos térmicos en pastas de cemento utilizando configuraciones como bobinas multicapa.
3. **Procesos térmicos e inducción:** Estudio de transferencias de calor en condiciones específicas.
4. **Variaciones de fraguado:** Simulación bajo diferentes temperaturas y condiciones ambientales para analizar resistencia y propiedades.

Se presentan simulaciones detalladas sobre la influencia de diferentes variables en el fraguado del cemento. Los modelos muestran cómo los factores térmicos y magnéticos afectan la estructura y propiedades del material. Los experimentos también evidencian la importancia de optimizar proporciones químicas y parámetros de operación para lograr mejores resultados en términos de resistencia y durabilidad.

La simulación computacional es una herramienta poderosa para optimizar el diseño de cementos y predecir su comportamiento bajo diversas condiciones.

Las variaciones en temperatura y composición impactan significativamente en la calidad del fraguado, lo que puede aplicarse a procesos de construcción más sostenibles y eficientes.

Índice General

Agradecimientos	2
Resumen 3	
Índice General	4
Índice de Figuras	6
Índice de Tablas	9
Capítulo 1. Introducción	10
1.1 Antecedentes	10
1.2 Objetivos	19
1.3 Justificación	19
Capítulo 2. Marco Teórico	21
2.1 Fundamentos teóricos del cemento y el fraguado	21
2.1.1 Definición	21
2.1.2 Principales componentes del cemento	21
2.1.3 Tipos de cemento	22
2.1.4 Análisis químico	23
2.1.5 Proceso de producción	23
2.1.6 El fraguado	25
2.2 Conceptos sobre electricidad y magnetismo	32
2.2.1 Corriente eléctrica y campos magnéticos asociados	32
2.2.2 Campo eléctrico entre cuerpos cargados	32
2.2.3 Electricidad y magnetismo	33
2.3 Transferencia de calor	43
2.3.1 Conducción	43
2.3.2 Convección	43
2.3.3 Radiación	44
2.4 Softwares	44
2.4.1 COMSOL Multiphysics	44
2.4.2 Aspen Plus	46

Capítulo 3. Metodología.....	50
3.1 Simulación de la química del cemento en Aspen Plus	50
3.1.1 Desarrollo del modelo de simulación para el proceso de fraguado del cemento.....	50
3.2 Simulación de campos magnéticos y transferencia de calor para muestras de cemento.....	64
3.2.1 Una bobina de aire multicapa	64
3.3 Transferencia de calor en la bobina.....	80
3.3.1 Simulación de calentamiento por inducción	80
3.4 Simulaciones del fraguado del cemento con HETT ²²	85
3.4.1 Estudio del fraguado del cemento.....	85
Capítulo 4. Resultados.....	89
4.1 Simulación de la química del cemento en Aspen Plus.....	89
4.1.1 Análisis cualitativo del producto.....	89
4.1.2 Análisis de sensibilidad.....	91
4.2 Simulaciones de campos magnéticos y transferencia de calor con pruebas de cemento en COMSOL Multiphysics.....	100
4.2.1 Campos magnéticos una bobina de aire multicapa	100
4.2.2 Transferencia de calor en la bobina.....	103
4.3 Simulaciones del fraguado del cemento en COMSOL Multiphysics.....	108
Capítulo 5. Conclusiones y trabajo futuro.....	119
5.1 Conclusiones y recomendaciones para la simulación en Aspen Plus®..	119
5.2 Conclusiones y recomendaciones para la simulación de campos magnéticos y transferencia de calor con COMSOL Multiphysics.....	120
5.3 Conclusiones y recomendaciones para la simulación del fraguado del cemento en HET ²²	121
5.4 Conclusión general	123
5.5 Trabajos Futuros	124
Referencias.....	126

Índice de Figuras

Figura 1 Diagrama de bloques del proceso de producción de cemento almacenado	23
Figura 2 Fuerza electromotriz entre cuerpos cargados	33
Figura 3 Corriente alterna.....	35
Figura 4 Onda sinusoidal de la corriente eléctrica inducida en una bobina.....	36
Figura 5 Longitud de un alambre y su resistencia.....	38
Figura 6 Simulación en COMSOL Multiphysics	45
Figura 7 Diagrama de flujo de una simulación en Aspen Plus.....	48
Figura 8 Plantilla para usar durante la simulación en AspenPlus®.....	51
Figura 9 Introducción de los componentes del cemento	52
Figura 10 Introducción de los componentes de las reacciones de hidratación deseadas.....	52
Figura 11 Introducción de la ettringita en el simulador como “conglomerado”	53
Figura 12 Introducción de los componentes de las reacciones de hidratación controladas.....	54
Figura 13 Introducción de todos los componentes de las reacciones de hidratación	55
Figura 14 Introducción de parámetros	56
Figura 15 Método base de simulación.....	57
Figura 16 Diagrama del proceso de fraguado dentro del simulador	58
Figura 17 Condiciones de operación de los reactores estequiométricos	59
Figura 18 Fases de corrientes a la salida del segundo reactor.....	59
Figura 19 Reacciones de hidratación en el primer reactor	60
Figura 20 Reacciones de hidratación en el segundo reactor	60
Figura 21 Composición, en fracción másica, de alita, belita, celita, ferrita y yeso en el cemento.....	61
Figura 22 Composición, en fracción másica, de sulfito, cal libre y magnesia en el cemento.....	62
Figura 23 Cantidad de cemento en la alimentación al primer reactor	62
Figura 24 Cantidad de agua en la alimentación al primer reactor	63
Figura 25 Cantidad de CO_2 en la alimentación al segundo reactor	63
Figura 26 Selección de la física de campos magnéticos en COMSOL Multiphysics	65
Figura 27 Selección de estudio tipo estacionario en COMSOL Multiphysics	65
Figura 28 Ajustes de parámetros iniciales de una bobina de aire multicapa en COMSOL Multiphysics.....	66

Figura 29 Configuración de la geometría para una bobina multicapa en COMSOL Multiphysics.....	66
Figura 30 Agrupación de dominios en una geometría de una bobina de aire multicapa en COMSOL Multiphysics	67
Figura 31 Secciones dentro de una geometría para una bobina de aire multicapa en COMSOL Multiphysics.....	68
Figura 32 Sección de elementos infinitos para la geometría de una bobina de aire multicapa en COMSOL Multiphysics	69
Figura 33 Sección de elementos conductores para la geometría de una bobina de aire multicapa en COMSOL Multiphysics.....	69
Figura 34 Sección de elementos no conductores para la geometría de una bobina de aire multicapa en COMSOL Multiphysics.....	70
Figura 35 Selección de dominio de elementos infinitos en una bobina de aire multicapa en COMSOL Multiphysics	70
Figura 36 Selección de material cobre para la bobina de aire multicapa en COMSOL Multiphysics.....	71
Figura 37 Selección de material aire para la bobina de aire multicapa en COMSOL Multiphysics.....	71
Figura 38 Selección de campos magnéticos para la bobina de aire multicapa en COMSOL Multiphysics.....	72
Figura 39 Selección de parámetros para la bobina en los campos magnéticos de una bobina de aire multicapa en COMSOL Multiphysics	72
Figura 40 Ajustes sobre campos magnéticos de una bobina de aire multicapa en COMSOL Multiphysics.....	73
Figura 41 Ecuaciones involucradas en los campos magnéticos de una bobina de aire multicapa en COMSOL Multiphysics.....	73
Figura 42 La ley de Ampère en la simulación de una bobina de aire multicapa en COMSOL Multiphysics.....	74
Figura 43 Representación de geometría “Núcleo COMSOL” para una bobina de aire multicapa en COMSOL Multiphysics.....	75
Figura 44 Ajustes de malla para una bobina de aire multicapa en COMSOL Multiphysics.....	75
Figura 45 Resultados sobre los campos magnéticos de una bobina de aire multicapa en COMSOL Multiphysics	76
Figura 66 Campos magnéticos en Gauss en el estudio con tubo intermedio.....	102
Figura 67 Temperaturas alcanzadas en la simulación para la bobina y tubo interior a 120 segundos.....	103
Figura 68 Temperaturas alcanzadas en la simulación para la bobina y tubo interior para 56 segundos.	104
Figura 69 Comparación de la transferencia de calor para diversos materiales en el tubo interior de la bobina de aire multicapa	105

Figura 70 Geometría circular seleccionada para la simulación del fraguado el cemento en HET22.....	109
Figura 71 Variación de la temperatura (en °C) con respecto al tiempo (en horas), como resultado de la simulación del fraguado el cemento con temperatura ambiental de 18°C en HET22.....	111
Figura 72 Resistencia (en MPa) en función del tiempo (en horas) como resultado de la simulación del fraguado el cemento A 18°C en HET22.....	112
Figura 73 Variación de la temperatura (en °C) con respecto al tiempo (en horas), como resultado de la simulación del fraguado el cemento A 24°C en HET ²²	115
Figura 74 Resistencia (en MPa) en función del tiempo (en horas) como resultado de la simulación del fraguado el cemento A 24°C en HET ²²	115
Figura 75 Variación de la temperatura (en °C) con respecto al tiempo (en horas), como resultado de la simulación del fraguado el cemento a temperatura ambiental de 32°C en HET ²²	116
Figura 76 Resistencia (en MPa) en función del tiempo (en horas) como resultado de la simulación del fraguado el cemento a temperatura ambiental de 32°C en HET ²²	116

Índice de Tablas

Tabla 1 Principales componentes del cemento portland.....	21
Tabla 2 Impurezas del cemento portland.....	22
Tabla 3 Análisis químico de muestra de cemento portland	23
Tabla 4 Efecto de los componentes del fraguado sobre el concreto o mortero	31
Tabla 5 Efecto de otros minerales sólidos sobre el concreto o mortero	31
Tabla 6 Definición del comportamiento de las reacciones en el primer reactor	60
Tabla 7 Definición del comportamiento de las reacciones en el segundo reactor ..	61
Tabla 8 Resultados cuantitativos de la simulación de la química del cemento en Aspen Plus.....	89
Tabla 9 Masa de minerales complejos.....	90
Tabla 10 Masa de minerales complejos sin compuestos no deseados.....	91
Tabla 11 Resultados de entalpía y densidad para varias temperaturas en el producto final de la simulación.....	96
Tabla 12 Parámetros experimentales a utilizar en la bobina de aire multicapa ...	100
Tabla 13 Propiedades del cemento a utilizar con HET ²²	110

Capítulo 1. Introducción

1.1 Antecedentes

El cemento Portland es un material en forma de polvo fino, compuesto principalmente por silicatos de calcio y, en menor medida, por aluminatos de calcio. Al entrar en contacto con el agua, reacciona químicamente, iniciando su fraguado y posterior endurecimiento a temperatura ambiente, tanto en ambientes secos como sumergidos en agua.

Desde la época romana, ya se utilizaban materiales cementantes naturales para la unión de piedras en construcciones. En particular, empleaban una mezcla de cal con materiales volcánicos provenientes de la región de Pozzuoli, cercana al Vesubio, lo que dio origen al término "puzolanas" para referirse a los materiales con propiedades similares.

En 1812, Louis Joseph Vicat desarrolló una cal artificial a partir de la calcinación de una mezcla homogénea de caliza y arcilla, previamente molidas y mezcladas en húmedo. Para 1818, explicó de manera científica el funcionamiento de estos conglomerantes y denominó al material resultante cal hidráulica. Con esta innovación, construyó el primer puente sobre el río Dordoña [1] .

Más adelante, en 1824, Joseph Aspdin patentó el cemento Portland, cuyo proceso de fabricación guardaba similitudes con el método descrito por Vicat. Desde entonces, la tecnología relacionada con el cemento Portland ha evolucionado significativamente, dando lugar a mejoras en su producción y aplicación.

A lo largo del tiempo, este material se ha convertido en el más empleado en la industria de la construcción a nivel global. Actualmente, existen más de 1,500 plantas cementeras que producen anualmente más de 800 millones de toneladas de este compuesto. Su importancia ha fomentado un extenso campo de investigación, reflejado en la publicación de miles de libros y en la creación de diversas asociaciones e instituciones dedicadas al estudio y desarrollo del cemento.

Algunos tipos de cementos distintos del cemento portland

Cemento de aluminato de calcio

El cemento de aluminato de calcio (CaC) tuvo su origen en Francia durante la Primera Guerra Mundial. Su desarrollo se basó en una patente del químico francés Jules Bied, discípulo de Le Chatelier, quien en 1908 identificó que los compuestos cristalizados con una composición de aluminato monocálcico podían reaccionar hidráulicamente, logrando un endurecimiento rápido y una resistencia elevada en sus primeras etapas.

Cementos expansivos

A partir de 1920, comenzaron a desarrollarse los cementos expansivos, cuyo estudio estuvo a cargo de Viktor Vasilévich Mikhaïlov y Alexander Klein. Estos cementos se caracterizan por contener altas concentraciones de sulfatos y aluminatos, lo que les otorga su capacidad de expansión [1].

Cemento Portland resistente a sulfatos

El primer cemento Portland con alta resistencia a los sulfatos fue el "Erdzement", patentado en 1901 por Krupp-Grusonwerk en Magdeburgo y fabricado en la planta cementera de Hemmoor, cerca de Hamburgo. Su fórmula contenía bajos niveles de óxido de aluminio y un alto contenido de óxido de hierro, lo que resultó en un módulo de fundentes (relación Al/Fe) de apenas 0.30. Posteriormente, en Italia, se produjo por primera vez en 1919 un cemento con propiedades similares, conocido como Cemento Ferrari, con un módulo de fundentes de 0.64.

Cemento sobresulfatado

El desarrollo del cemento sobresulfatado se remonta a 1862, cuando Emil Langen descubrió que una mezcla de escoria granulada de alto horno, altamente vitrificada y combinada con cal viva, podía alcanzar una resistencia significativa. Años después, en 1882, Godhard Prossing (1828-1903) fue pionero en la adición de escoria granulada al cemento Portland. En Alemania, desde 1901, se diferenciaron dos tipos de cemento: el cemento Portland siderúrgico, con menor contenido de escoria, y el cemento de escoria de alto horno, con un mayor porcentaje de este

material (desde 1907). Un avance clave ocurrió en 1908, cuando Hans Kühn (1879-1969) patentó el "gipsschlackenzement" (DRP 237777), al descubrir que la escoria granulada de alto horno podía activarse mediante sulfatos, sentando las bases para la producción de este tipo de cemento.

Cemento Portland y sus antecedentes

De acuerdo con la norma europea UNE-EN 197-1:2011, los cementos son considerados conglomerantes hidráulicos, es decir, materiales inorgánicos y minerales que, al ser molidos finamente y mezclados con agua, forman una pasta que fragua y se endurece debido a reacciones químicas de hidrólisis e hidratación. Este proceso da lugar a compuestos resistentes y estables tanto en condiciones secas como en ambientes acuáticos. La capacidad del cemento para endurecer hidráulicamente se debe, principalmente, a la formación de silicatos cálcicos hidratados y aluminatos hidratados. Gracias a esta propiedad, se ha convertido en un material esencial en la construcción, tanto para edificaciones como para infraestructuras.

A lo largo del tiempo, diversas teorías han intentado explicar la constitución y reacciones del cemento Portland. Con los avances científicos y tecnológicos, algunas hipótesis han sido verificadas y otras descartadas. Le Chatelier sostenía que el principal componente del cemento Portland era el silicato tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ o C_3S), considerándolo responsable del fraguado y endurecimiento, mientras que los aluminatos presentes eran vistos como impurezas.

Por otro lado, Törnebohm, a través de observaciones microscópicas, identificó cinco minerales distintos en el cemento, los cuales denominó alita, belita, celita, felita y residuo vítreo. Coincidió con Le Chatelier en que la alita, con propiedades similares al silicato tricálcico, era el principal responsable del endurecimiento del cemento Portland.

En sus primeros estudios, Michaelis respaldó la hipótesis de Le Chatelier, pero posteriormente propuso una teoría diferente sobre el fraguado y endurecimiento de los conglomerantes hidráulicos. Según él, no se producían combinaciones cristalinas, sino que la sílice permanecía en estado coloidal, funcionando de manera

similar a un adhesivo. De acuerdo con su planteamiento, el endurecimiento ocurría por la desecación de la sílice, una idea cercana a las teorías de Marceron y Vicat. En estudios posteriores, Michaelis coincidió con Day y Shepherd en que el ortosilicato cálcico ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ o C_2S) era el componente clave del cemento Portland. Según su análisis, el silicato tricálcico no era un compuesto puro, sino una solución sólida de CaO en C_2S .

Otro investigador, Walter Dyckerhoff, también concluyó que el cemento Portland estaba compuesto en su mayoría por silicato bicálcico (C_2S), en el cual se podían identificar tres variedades: α , β y γ . De estas, solo la β -modificación poseía propiedades hidráulicas, pero resultaba inestable por debajo de 675°C .

Durante el proceso de fabricación del cemento, los aluminatos y ferritos cálcicos generan una fase fundida que envuelve y protege los cristales de silicato, evitando su transformación en la fase γ , que provocaría la desintegración del material. Newberry respaldaba la teoría de Le Chatelier, en la que se considera que el baño conglomerante del cemento Portland es una sustancia amorfa con una composición variable, en la que se concentra la mayor parte del hierro y la alúmina. Sin embargo, difería de Le Chatelier en cuanto a la relevancia de los aluminatos en el clínker del cemento Portland, argumentando que el compuesto más significativo no es el $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A), sino el $2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ (C_2A).

Por otro lado, Zulkowski sostenía que el silicato tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ o C_3S) no estaba presente en el cemento Portland. En su lugar, reconocía dos tipos de silicato bicálcico ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ o C_2S): una forma estable, conocida como ortosilicato, y otra inestable, denominada metasilicato. Según su análisis, solo el metasilicato presentaba propiedades hidráulicas, mientras que el ortosilicato era responsable de la degradación del cemento. Para evitar este problema, proponía que el silicato inestable debía someterse a un enfriamiento rápido a baja temperatura, evitando así su conversión total o parcial en su isómero.

Desde otro enfoque, Otto Schott analizó las propiedades de los silicatos, aluminatos y ferritos cálcicos, llegando a la conclusión de que el silicato cálcico tiende a experimentar fenómenos de expansión. Debido a esto, su incorporación en la

formulación del cemento Portland debe realizarse en cantidades limitadas. Además, sugirió que el clínker del cemento Portland puede considerarse una solución sólida de cal en aluminato bicálcico (C_2S), y que sus propiedades hidráulicas mejoran proporcionalmente a la cantidad de cal disuelta en su estructura.

El material del que se componen la gran mayoría de las estructuras actuales, tan duro como la roca, es la culminación de siglos de experiencias y métodos a lo largo de la historia humana: el concreto y el mortero. Para obtener estos productos, la humanidad descubrió cómo fabricar cemento, y cómo endurecer el cemento adicionando agua, proceso denominado “fraguado”.

El cemento común tiene como materias primas arcilla, caliza y yeso, rocas y tierras que se encuentran comúnmente en el suelo, y se especula que desde el 7000 a. C. en zonas de la actual Turquía, se hacía uso de arcillas y calizas para pavimentar suelos. Su uso era muy primitivo y no se calcinaba ni la caliza ni la arcilla, proceso fundamental para crear cemento. Por otro lado, el yeso era el principal material de construcción en Egipto, y fue calcinado junto a una poca cantidad de calizas entre 120° y $160^\circ C$. Al adicionar agua a este producto, para crear las características esculturas faraónicas, se obtuvo también el primer fraguado, y el primer antecedente de una reacción de hidratación para uso en la construcción. El primer cemento, sin embargo, vendría del mundo helénico.

Aproximadamente en el siglo XII a. C., los antiguos griegos crearon el estuco (mezcla de cal, yeso, pigmentos naturales, agua, etc.), material similar al usado en las estructuras egipcias, con el objetivo de embellecer sus paredes, y en el siglo II a. C., añadiendo arena fina (arcilla) a la mezcla, se obtiene el primer cemento para la construcción de muros en las casas de Délos y de Thèra.

Los romanos, los herederos de la cultura griega, hubieron perfeccionado el procedimiento para crear cemento. Se percataron de que, al triturar la caliza, aumenta la impermeabilidad, acelera el fraguado (el endurecimiento) y mejora la durabilidad del producto. Esto se debe a que un menor tamaño de partícula de cal obliga al agua a reaccionar en mayores cantidades, dando lugar a una mayor cantidad de compuestos que aportan las propiedades duraderas. Además, la

calcinación se realizaba a 1000°C, lo que provoca una mayor ruptura de los componentes de la cal y la arcilla, y a mayor ruptura de estos componentes es mayor la calidad del cemento. Por último, al añadir diversos materiales como puzolanas o ceniza volcánica, observaron que el cemento resultante podía ser usado bajo el agua, construyendo las primeras cisternas y acueductos. En la actualidad, los distintos materiales añadidos determinan el tipo de cemento a producir.

A pesar del gran avance del imperio romano, a la caída de este y durante la época medieval, las investigaciones del cemento y del fraguado fueron nulas, e incluso existió una disminución en la calidad, dando lugar en su mayoría a estructuras mediocrementemente débiles. Algunos teóricos atribuyen este descenso a un mal proceso de producción, que involucra la calcinación, la proporción y granulometría de la materia prima; otros más la atribuyen al proceso de fraguado, que es la aplicación del cemento en la obra, y que influye directamente en la consistencia y durabilidad del mortero o concreto. No existe un progreso notable, pero se concluye la importancia de un buen fraguado en el impacto que tendrá sobre la durabilidad.

A finales del siglo XVIII y principios del XIX, la necesidad de desarrollar materiales aptos para construcciones sumergidas llevó a un renovado interés en la investigación sobre cementos. Louis Vicat realizó estudios sobre las calizas y arcillas, identificando que estas estaban compuestas principalmente por silicatos y aluminatos, respectivamente. Determinó que la calcinación de ambos materiales en combinación confería al producto resultante propiedades hidráulicas, lo que significaba que, al entrar en contacto con el agua, sus partículas reaccionaban químicamente, endureciéndose con el tiempo.

Durante este período, se optó por incrementar el contenido de aluminatos en la producción de cemento, lo que llevó a la adición de cantidades significativas de arcilla en su formulación. Sin embargo, estudios más recientes han demostrado que es preferible una mayor proporción de silicatos, ya que los aluminatos en exceso pueden provocar un fraguado acelerado.

Las investigaciones de Vicat marcaron un punto de partida para experimentaciones adicionales sobre el proceso de fraguado. En 1824, Joseph Aspdin, un albañil

británico, patentó un cemento con una dureza similar a la de la piedra Portland. No obstante, su calidad inicial no era óptima, ya que el material no se sometía a temperaturas suficientemente altas durante la calcinación. Fue su hijo, William Aspdin, quien en 1838 ajustó este parámetro, logrando una versión mejorada del cemento con mayor resistencia y durabilidad.

En 1850, se estandariza una temperatura de entre 1300° y 1400°C, esto permitía una mayor cohesión química entre la arcilla y la caliza, y posteriormente se le adicionaba yeso para prolongar el tiempo de fraguado. Este cemento se expuso en 1851 con gran publicidad y las técnicas de producción fueron imitadas alrededor del mundo.

Desde finales del siglo XIX, el proceso de producción no ha cambiado sustancialmente, y tampoco lo ha hecho el proceso de fraguado, aunque las herramientas tecnológicas lo han hecho, de ellas podemos aprovecharnos para mejorar aún más la calidad del mortero y concreto, y los softwares de simulación son una opción fuertemente viable.

A continuación, se mencionarán algunas de las aportaciones e investigaciones realizadas sobre el cemento, su aplicación, proceso y fraguado:

Fraguado y endurecimiento del cemento

El fraguado hidráulico se refiere a la capacidad de ciertos aglomerantes, como el cemento Portland, para endurecerse en presencia de agua debido a la reacción entre silicatos y aluminatos. Su resistencia y durabilidad dependen de la proporción de agua utilizada, ya que un exceso genera porosidad y fisuras, reduciendo su capacidad estructural. La relación agua/cemento, la granulometría y la consistencia de la mezcla son factores clave en la calidad del concreto, siendo la prueba de revenimiento un método útil para evaluar sus propiedades [1].

Estructura molecular del agua y materiales cementantes alternativos

El agua, debido a su polaridad y ángulo molecular de 105°, juega un papel fundamental en las reacciones de hidratación del cemento. Diversos estudios han

demostrado que materiales ricos en sílice, como el humo de sílice y la ceniza volante, pueden mejorar la resistencia del concreto, actuando como reemplazos parciales del cemento Portland. Estos materiales aceleran la hidratación y mejoran su durabilidad [2], [3], [4], [5].

Durabilidad del concreto y materiales suplementarios

Investigaciones han mostrado que la combinación de cemento Portland con cenizas volantes y humo de sílice mejora la resistencia del concreto frente a agentes agresivos, como los sulfatos y los álcalis. Se ha identificado un efecto sinérgico entre estos componentes: mientras la ceniza volante mejora la trabajabilidad, el humo de sílice compensa su baja resistencia inicial. Además, el concreto con mezclas ternarias ofrece mayor protección contra la penetración de iones cloruro [6].

Aplicaciones del láser en el cemento y el concreto

El uso de radiación láser en materiales cementantes ha demostrado ser útil en diversas aplicaciones, como la limpieza de superficies contaminadas, la modificación de su apariencia y la mejora de su microestructura. Estudios han revelado que la radiación láser puede inducir cambios en la textura y cristalización del concreto, generando superficies más compactas y resistentes. También se ha utilizado en la inspección de carbonatación del hormigón, permitiendo una detección precisa del carbono generado en estructuras envejecidas [7], [8], [9], [10].

Perforación y corte de hormigón con láser

El empleo de láser en la perforación de hormigón ha demostrado ser eficiente en la creación de vías de flujo para aplicaciones en la industria petrolera. Investigaciones han evaluado el impacto del agua en la perforación láser, encontrando que la evaporación es el mecanismo predominante en superficies secas, mientras que en superficies húmedas se observa un efecto de dispersión. Además, el uso de láser de diodo ha mostrado una mayor profundidad de corte en comparación con el láser de CO₂ [10], [11].

Eliminación de recubrimientos y seguridad en procesos láser

El láser se ha empleado para la eliminación de recubrimientos en superficies de hormigón, facilitando el proceso mediante el análisis de reflectividad y comportamiento térmico. Se han evaluado aspectos de seguridad, confirmando que no se generan emisiones radiactivas en la reducción láser de hormigón, y que las partículas resultantes pueden identificarse como constituyentes originales del material tratado [12], [13], [14].

Propiedades ópticas y térmicas del cemento y hormigón

Estudios han determinado que la absorción de radiación láser en el hormigón depende de su composición y temperatura. Se ha comprobado que el acristalamiento superficial inducido por láser mejora la resistencia al desgaste del cemento Portland, prolongando su vida útil hasta 17 veces en comparación con superficies sin tratar [9], [15], [16], [17], [18], [19].

Efectos del campo magnético en el cemento y el agua

Se ha investigado la influencia de campos magnéticos en la cristalización de carbonato de calcio y en la adsorción de contaminantes en agua mediante carbón activado, mostrando resultados favorables. Además, estudios espectroscópicos han evidenciado cambios en la estructura molecular del agua bajo la influencia de campos magnéticos, afectando sus propiedades de difusión y enlaces de hidrógeno [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27].

Sinterización y modelado numérico en la fabricación de concreto

La sinterización selectiva por láser (SLS) ha sido clave en la fabricación aditiva de materiales cementantes, permitiendo el desarrollo de estructuras complejas mediante la fusión controlada de polvos metálicos y poliméricos. Modelos matemáticos han simulado la transferencia de calor en el proceso de fusión láser, optimizando los parámetros de operación para mejorar la calidad de los materiales obtenidos [28], [29], [30], [31], [32], [33], [34], [35].

1.2 Objetivos

Objetivo General

Desarrollar un algoritmo de solución para medir y analizar propiedades mecánicas, químicas y ópticas de muestras de cemento en su proceso de fraguado.

Objetivos Particulares

- Desarrollar una simulación sobre el efecto de los campos magnéticos hacia las muestras de cemento y su efecto en la transferencia de calor.
- Simulación o estudio de las reacciones químicas en el proceso del fraguado del cemento.
- Probar mediante simulación en Aspen Plus sobre algunos estudios anteriores sobre el fraguado del cemento a diferentes temperaturas y % de agua en la mezcla de cemento.
- Simular diferentes el efecto de cambios de diferentes variables tales como temperatura de curado, radiación láser en COMSOL Multiphysics.
- Simular muestras de cemento con diferentes condiciones a las experimentadas con el equipo de investigación anteriormente.
- Validar el modelo de simulación con datos experimentales: Utilizar datos experimentales proporcionados por bibliografías y experimentos para validar y calibrar el modelo computacional, asegurando que los resultados de la simulación sean precisos y representativos de las condiciones reales.

1.3 Justificación

El cemento portland destaca por su gran trabajabilidad una vez hidratado y su alta durabilidad cuando es endurecido, y aunado a su economía lo convierten en una de las mejores opciones como material de construcción. Su proceso de producción es

bien conocido e incluso ha sido simulado, sin embargo, otro de los factores que impactan fuertemente por sus propiedades físicas en las construcciones, es el fraguado, y de este la investigación es reciente y escasa.

Las complejas reacciones de hidratación que ocurren en el fraguado del cemento tienen un tiempo de reacción bastante elevado, y en los estudios del proceso realizados empíricamente, como lo son los métodos por espectroscopía, el tiempo para obtener resultados puede llevar años. La conversión de los compuestos del cemento hacia productos endurecidos tiende a ser más lenta conforme pasa el tiempo de fraguado, por ello las reacciones pueden tardar años en culminar o no culminar nunca, y eso es un problema si se desea replicar el proceso en un laboratorio de forma experimental, con complejos equipos y métodos espectroscópicos, y a ello se deben las razones para usar software de simulación: el estudio económico y temporal, pudiendo reducir a pocos minutos el análisis que de otra forma tomaría años y sería costoso, ahorrando en materiales, en uso, mantenimiento y calibración de equipos, en personal, en interpretación de análisis, todo ello manteniendo la eficacia empírica y un costo mínimo.

Además, el proceso cinético que ocurre en cada reacción de hidratación suele ser muy complejo, y no existen modelos matemáticos ni termodinámicos que lo definan con exactitud, sin embargo, puede ser simplificado dentro del simulador, con ayuda de las contribuciones y estudios parciales que se han realizado, como el estudio por espectroscopía infrarroja del Ing. Vázquez Moreno.

El uso de Aspen Plus®, por otro lado, ha sido nulo para simulaciones sobre el fraguado, no se ha realizado algún estudio o investigación del proceso con este software, por lo que los análisis que aquí se desarrollan implican una novedad en su estudio químico y computacional.

Mediante la simulación del fraguado del cemento se podrían realizar diversos estudios a un menor costo y tiempo, probar nuevas alternativas de diseño del proceso, facilitar el entendimiento de su comportamiento químico para estimar los efectos de distintas perturbaciones, y solucionar posibles problemas mucho antes de que afecten las estructuras.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1 Fundamentos teóricos del cemento y el fraguado

2.1.1 Definición

El cemento es una mezcla fina de diversos minerales sólidos molidos extraídos de la tierra que le otorgan la propiedad de conglomerante hidráulico, es decir, la capacidad de endurecerse irreversiblemente en contacto con el agua, proceso denominado fraguado. A los productos resultantes de la hidratación del cemento, dependiendo de los agregados, se les llama concretos y morteros, materiales que poseen una gran dureza y resistencia.

2.1.2 Principales componentes del cemento

Dado que las materias primas para producir cemento (arcillas y calizas) se extraen de la tierra y esta no presenta uniformidad en su mezcla sólida, los componentes suelen ser diversos; algunos de ellos son deseados ya que aumentan la calidad del cemento; y existen otros, en pequeñas cantidades, que pueden perjudicar gravemente su calidad. En la tabla 1 y 2 se mencionan los principales componentes del cemento que influyen fuertemente en el fraguado, a la par de la fórmula estandarizada para lo referido exclusivamente al cemento.

Tabla 1 Principales componentes del cemento portland [36]

COMPUESTO SÓLIDO	FÓRMULA QUÍMICA	FÓRMULA ABREVIADA	MINERAL
SILICATO TRICÁLCICO	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C3S	Alita
SILICATO DICÁLCICO	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C2S	Belita
ALUMINATO TRICÁLCICO	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C3A	Celita
FERROALUMINATO TETRACÁLCICO	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C4AF	Ferrita
YESO DIHIDRATADO	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	-	-

Tabla 2 Impurezas del cemento portland [37]

COMPUESTO SÓLIDO	FÓRMULA QUÍMICA	MINERAL
TRIÓXIDO DE AZUFRE	SO ₃ -2	Sulfito
ÓXIDO DE MAGNESIO	MgO	Magnesia
ÓXIDO DE CALCIO	CaO	Cal libre

2.1.3 Tipos de cemento

De acuerdo con la norma NMX-C-414-ONNCCE-2010, existen diferentes clasificaciones para agrupar los diversos tipos de cemento; se incluye por su *composición*, de acuerdo con sus añadidos adicionales como humo de sílice o puzolanas; por sus *características especiales* como la resistencia a sulfatos; y por su *resistencia* a la compresión a los 28 días en N/mm².

Según la norma ASTM C-150 de la American Society of Testing Materials, para el cemento portland se encuentran las siguientes clasificaciones:

Tipo I. Cemento de uso general y sin añadidos adicionales. Se utiliza para la construcción de pisos, edificios y pavimentos.

Tipo II. Cemento de uso contra ataque leve de sulfatos. Se utiliza para la construcción de tuberías de drenaje, muros de contención y pilas. Posee una cantidad menor al 10% de C3A.

Tipo III. Cemento de fraguado rápido. Se suele utilizar para construcciones urgentes, como autopistas o carreteras.

Tipo IV. Cemento de fraguado lento. Es dirigido a obras masivas como presas. Poseen cantidades de alrededor de 40% de silicatos y 7% de aluminatos.

Tipo V. Cementos de alta resistencia contra sulfatos. Poseen un contenido máximo de 5% de C3A.

2.1.4 Análisis químico

El Doctor en Ciencias Químicas del IETcc, Tomás Vázquez Moreno, realizó un estudio de la hidratación del cemento portland tipo I, donde se obtuvo su composición por medio de espectroscopía infrarroja, arrojando los siguientes resultados mostrados en la tabla 3:

Tabla 3 Análisis químico de muestra de cemento portland [37]

Compuesto	COMPOSICIÓN (% PESO)
SiO ₂	22.6
Al ₂ O ₃	6.28
Fe ₂ O ₃	2.44
CaO	61.3
MgO	1.47
SO ₃	3.51
CaO libre	1.22

Lo anterior, sumado a diversas investigaciones de Udo Ludwig en 1972 y Powers & Browyard en 1948, sugiere que la composición de silicatos en el cemento portland tipo I se encuentra alrededor del 70% y 80%, siendo el porcentaje de C3S entre el 50% y 60%, mientras que C2S se encuentra entre 20% y 30%. Del mismo modo, se ubica el porcentaje de C3A entre 10% y 15%, similar al 5% y 10% de C4AF. El yeso, por último, no debe exceder el 3% del total de la mezcla de cemento.

2.1.5 Proceso de producción

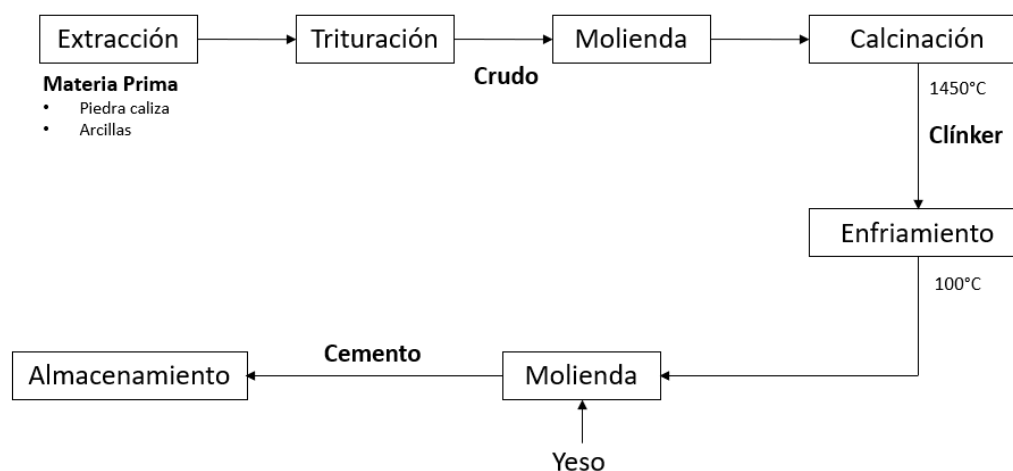


Figura 1 Diagrama de bloques del proceso de producción de cemento almacenado

2.1.5.1 Extracción

El proceso de producción comienza en la obtención de materias primas: *piedra caliza* y *arcilla*. La piedra caliza es dura, por lo que se crean yacimientos a cielo abierto y se explotan mediante voladuras controladas; mientras que, para la arcilla, se utilizan excavadoras, debido a su naturaleza blanda (figura 1).

2.1.5.2 Trituración

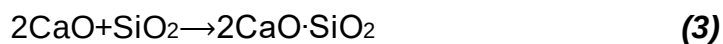
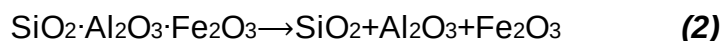
El material extraído se tritura hasta obtener una granulometría adecuada para su molienda. Posteriormente se traslada mediante cintas o camiones para ser homogeneizadas, de esta forma se mantienen las proporciones adecuadas de *caliza*, *sílice* y *alúmina*, minerales que constituyen a la materia prima.

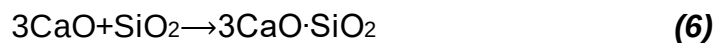
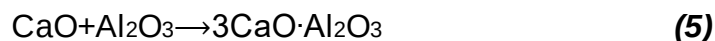
2.1.5.3 Molienda

Se utiliza un molino vertical o de bolas para reducir aún más el tamaño para facilitar su calcinación dentro del horno. Una vez almacenado en un silo, a este producto se le llama *harina cruda* o simplemente “*crudo*”.

2.1.5.4 Calcinación

La calcinación de la harina cruda se lleva a cabo entre los 1300° y 1400°C, sin embargo, para evitar un consumo de energía mayor, se alimenta a un precalentador de ciclones antes de su entrada al horno hasta los 1000°C, usando los gases del propio horno en contracorriente. Al producto a la salida se le llama clínker, resultado de la disociación de los componentes de la piedra caliza y la arcilla, para producir los principales compuestos del cemento: *alita*, *belita*, *celita* y *ferrita*, mediante las siguientes reacciones:





La cal obtenida a partir de la piedra caliza en **(1)** reacciona con todos los componentes que se han disociado de la arcilla en **(2)**. La cal reacciona con una pequeña parte del silicato en **(3)** produciendo belita en las primeras temperaturas del horno; reacciona posteriormente con una parte de alúmina y todo el hierro produciendo ferrita en **(4)**, mientras que en **(5)** reacciona con la alúmina restante para producir celita. La última reacción supone la de mayor importancia, a las más altas temperaturas del horno se produce alita a partir del resto del silicato en **(6)**. A la cal que no ha reaccionado se le llama cal libre.

2.1.5.5 Enfriamiento

La temperatura a la salida del horno se reduce rápidamente de los 1400°C hasta los 100°C, inyectando aire frío del exterior.

2.1.5.6 Molienda del clínker

Se adiciona yeso al clínker, y posteriormente se alimenta a molinos de bolas de acero, donde se reduce el tamaño y se homogeneiza obteniendo el fino producto final: el cemento.

2.1.5.7 Almacenamiento

El *cemento* se almacena en silos, esperando su distribución y uso directo en la obra para su proceso de fraguado.

2.1.6 El fraguado

2.1.6.1 Generalidades del fraguado

El fraguado es el proceso de endurecimiento del cemento debido a su dosificación y mezclado apropiado con agua y otros agregados, otorgándole trabajabilidad y moldeado en su estado fresco y durabilidad una vez endurecido.

2.1.6.2 Propiedades del cemento hidratado

El concreto o mortero de mejor calidad depende de ambos aspectos, su correcto proceso de producción en planta, y de su correcta puesta en marcha durante la obra. El endurecimiento del cemento es rápido al comienzo (de 3 a 7 días), y desacelera conforme pasa el tiempo, encontrando aún partículas de cemento sin reaccionar muchos días después

Entre las propiedades que deben destacar del cemento una vez hidratado, se espera:

Uniformidad. Todos los componentes de la mezcla deben presentar una distribución homogénea a lo largo de ella.

Trabajabilidad. Referido a la capacidad de la mezcla para ser colocada y consolidada fácilmente, así como para crear efectos arquitectónicos especiales.

Endurecimiento. Se estima que la pérdida de plasticidad del cemento comienza 10 horas después de haber sido mezclado con agua, aunque el proceso de fraguado comienza alrededor de las primeras 2 horas.

2.1.6.3 Factores que influyen en el proceso

Existen innumerables factores externos que pueden afectar el proceso de fraguado, sin embargo, aquellos que tienen un gran impacto son la humedad y la temperatura.

Bajas temperaturas, como en la gran mayoría de las reacciones químicas, provocan que el fraguado sea lento o simplemente se inactive; altas temperaturas, del mismo modo, provocan una aceleración anormal del fraguado, lo que puede ocasionar fisuras, pérdidas de resistencia y retracciones. Se estima que el fraguado es posible desde los 5°C y hasta los 35°C, y se ha normalizado que se realice entre los 20°C y 25°C, temperatura ambiente, a no ser que la obra en particular requiera lo contrario.

Entre los factores internos, además de la propia composición del cemento, aquel que tiene mayor impacto en el fraguado es la relación entre la cantidad de agua y la cantidad de cemento, denominada relación agua/cemento (A/C).

La calidad de la mezcla es determinada por la cantidad de agua adicionada, grandes cantidades de agua tendrán un efecto de debilitamiento, y pequeñas cantidades no podrán reaccionar completamente con los minerales del cemento.

2.1.6.4 Proporciones de agua y cemento

Aún sin entrar en el tema de los agregados, para conseguir la mejor trabajabilidad durante la hidratación del cemento y la mejor durabilidad cuando este sea endurecido, las proporciones sugeridas en el área de la construcción han surgido con base en la experiencia y la buena práctica, y para el cemento portland tipo I se ejemplifica como: Agua: 150 kg; Cemento: 300 kg; Agregados: 1600 kg.

De modo que, la relación agua/cemento que se recomienda es 150 kg de agua y 300 kg de cemento, es decir, 0.5. De este modo, se espera que las reacciones de hidratación tengan el mayor rendimiento posible.

2.1.6.5 Reacciones de hidratación deseadas

Para facilitar la clasificación y entendimiento de las reacciones de hidratación en el fraguado, se decidió tomar en cuenta el tipo de impacto que sus productos finales poseen sobre el concreto o mortero.

En este caso, las siguientes reacciones son las más beneficiosas para el producto endurecido, ya que de ellas se obtiene la dureza y la resistencia:



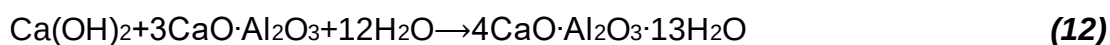
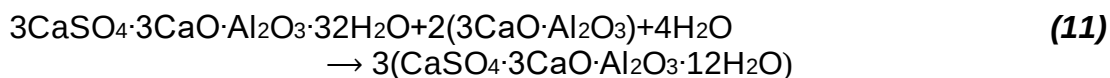
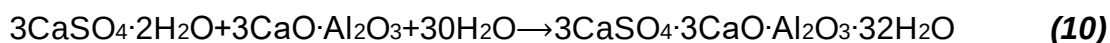
En (7), C3S reacciona con el agua, produciendo cristales de tobermorita ($3\text{CaO}\cdot 6\text{SiO}_2\cdot 5\text{H}_2\text{O}$) y portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Del mismo modo ocurre en (8), siendo la diferencia la cantidad producida de cada componente a partir de C2S.

2.1.6.6 Reacciones de hidratación controladas

Una vez consumidos los silicatos de calcio, parte de la portlandita reacciona con el CO₂ atmosférico en **(9)**, produciendo carbonato de calcio (CaCO₃) y vapor de agua debido al calor generado al ser reacciones exotérmicas.

De esta primera clasificación, los principales productos son la tobermorita y el carbonato de calcio. El hecho de que las materias primas sean piedra caliza y arcilla es debido a que la primera posee CaO y la segunda SiO₂, que posteriormente son unidos durante la calcinación produciendo C3S y C2S, los componentes más deseados del cemento portland tipo I.

Sin embargo, la composición química de la tierra no existe a nuestro deseo, y aquellos otros componentes de la arcilla, Al₂O₃ y Fe₂O₃, son calcinados a la par produciendo C3A y C4AF, y de estos componentes, el primero posee la capacidad de realizar un fraguado rápido, lo que es indeseable en este tipo de cemento, por ello se justifica la adición de yeso, de modo que actúe como retardante como se indica en las siguientes reacciones de hidratación de C3A:



Como se aprecia en **(10)**, el yeso dihidratado reacciona con C3A y agua produciendo cristales de ettringita (3CaSO₄·3CaO·Al₂O₃·32H₂O), producto intermedio el cual reacciona nuevamente en **(11)** con agua y mayores cantidades de C3A, produciendo finalmente monosulfoaluminato cálcico (3CaSO₄·3CaO·Al₂O₃·12H₂O).

Por último, en **(12)** la portlandita restante de los mecanismos anteriores, reacciona con agua y el C3A restante produciendo aluminato tetracálcico hidratado (4CaO·Al₂O₃·13H₂O).

De este modo, se evita el fraguado rápido, y ya que la velocidad de reacción de C4AF con el agua es un proceso en extremo lento, además de físicamente irrelevante para el concreto o mortero, para esta investigación se considerará inerte.

2.1.6.7 Reacciones de hidratación no deseadas

El proceso ideal del fraguado únicamente involucraría las reacciones deseadas y controladas, sin embargo, en la realidad existe una gran variedad de compuestos que se encuentran en la tierra, y aunque se presentan en pequeñas cantidades, los productos resultantes de sus reacciones de hidratación son aquellos que provocan debilitamientos de todo tipo en el material endurecido.

Se escogieron tres principales compuestos encontrados en el cemento que afectan negativamente la calidad una vez terminado el proceso de fraguado, y sus reacciones son las siguientes:



El deterioro estructural interno se debe principalmente a **(13)**, ya que un pequeño porcentaje de mineral de sulfito se encuentra en la mezcla de cemento, que al ser hidratado se disuelve produciendo ácido sulfúrico. Posteriormente, en **(14)**, el ácido sulfúrico roba una cantidad de portlandita para producir sulfato cálcico, y este último reacciona en **(15)**, consumiendo parte de C3A para producir ettringita expansiva.

Este mecanismo de reacción es el más tóxico para el fraguado, ya que, además de robar reactivos de las dos clasificaciones anteriores, el producto final produce expansiones que debilitan fuertemente la cohesión molecular, debiendo desecharse la partida completa.

Por otro lado, en **(16)**, la cal libre reacciona con agua produciendo hidróxido de calcio, isómero de la portlandita, con efectos negativos como agrietamientos y fraguados rápidos, similares a lo ocurrido en **(17)**.

2.1.6.8 Concretos y morteros

El concreto es la culminación del proceso de fraguado del cemento, una roca artificial durable y fuerte compuesta a su vez por agregados gruesos (grava o rocas trituradas), agregados finos (arena) y otros compuestos adicionales/opcionales.

El cemento hidratado rellena los vacíos de los agregados, que se suponen inertes, actuando primero como lubricante y finalmente como adhesivo, de modo que entre sus características finales se espera:

Durabilidad. La contramedida a las adversidades del medio ambiente, el congelamiento o el ataque químico.

Resistencias. Resistencia alta a la compresión, estimada entre los 20 y 50 MPa; baja resistencia a la tensión, alrededor del 10% de su resistencia a la compresión, así como resistencia contra la abrasión y baja permeabilidad al agua.

Contracción. El agua que no ha reaccionado en el proceso de fraguado supone un decremento del volumen final al ser evaporada, manteniendo una densidad final entre 2240 y 2400 kg/m³.

Para obtener una mezcla factible de concreto, se deben tomar en cuenta tres principales factores:

Trabajabilidad del cemento hidratado. Aquello que corresponde a la correcta adición de agua en una relación (A/C) apegada a 0.5.

Calidad del concreto. Entre otros factores, se debe principalmente al control de humedades, temperaturas y tiempos de fraguado, sumado a la adecuada composición de cemento.

Economía. El hecho de que el concreto sea el más popular material de construcción se debe a que su uso es muy barato, comparado con otros materiales como el acero o la madera.

2.1.6.9 Efectos de los productos finales sobre el concreto o mortero

En las tablas 4 y 5 se muestran los principales productos a partir de las tres clasificaciones propuestas de reacciones de hidratación y de otros componentes no incluidos, con su respectivo comportamiento sobre el concreto o mortero:

Tabla 4 Efecto de los componentes del fraguado sobre el concreto o mortero [37]

COMPONENTE	EFEECTO
TOBERMORITA	Resistencia y durabilidad más significativa del material endurecido desde los primeros días
CARBONATO DE CALCIO C4AF	Resistencia moderada a largo plazo Tonalidad gris característica del concreto y mortero
MONOSULFOALUMINATO CÁLCICO	Leve aportación a la resistencia
ALUMINATO TETRACÁLCICO HIDRATADO	Leve aportación a la resistencia
ETTRINGITA EXPANSIVA	Expansiones graves y debilitamientos debido al robo de reactivos
HIDRÓXIDO DE CALCIO	Expansiones leves y agrietamientos
HIDRÓXIDO DE MAGNESIO	Agrietamientos y fisuras

Tabla 5 Efecto de otros minerales sólidos sobre el concreto o mortero [37]

COMPONENTE	EFEECTO
Mn_2O_3	Menor resistencia a edades tempranas
SrO	Destrucción de C3S
K_2SO_4	Perjudica el desarrollo de resistencias
ÁLCALIS	Reacciones expansivas

2.1.6.10 La fabricación del cemento y el medio ambiente

Los aspectos ambientales más importantes de la fabricación de cemento son el consumo energético y la emisión a la atmósfera de partículas y de gases de combustión (óxidos de nitrógeno (NO_x) y óxidos de azufre (SO_2)). La medición de las emisiones en fuentes localizadas es necesaria para cumplir con los límites de emisión. Las emisiones del horno dependen de las propiedades de las materias primas (humedad, contenido en compuestos sulfurosos volátiles, dificultad de cocción, etc) y del tipo de horno empleado (vías húmeda, semihúmeda, semiseca o seca). Los vertidos de agua se limitan a las escorrentías de lluvia, la refrigeración

de equipos (normalmente en circuito cerrado) y al agua sanitaria, y no representan un impacto ambiental significativo.

2.2 Conceptos sobre electricidad y magnetismo

2.2.1 Corriente eléctrica y campos magnéticos asociados

La corriente eléctrica es el flujo constante y controlado de electrones a través de un material conductor. Como se ha estudiado, los cuerpos con carga eléctrica generan una fuerza que puede atraer o repeler otros cuerpos según su carga: cargas iguales se repelen y diferentes se atraen. Esta interacción ocurre dentro de lo que se conoce como campo eléctrico.

La fuerza que impulsa a los electrones a moverse se llama fuerza electromotriz (FEM), que representa el trabajo necesario para trasladar una carga entre dos puntos.

Cuando un objeto tiene más electrones de lo normal, adquiere carga negativa. Esto se debe a que cada electrón posee una carga negativa constante que siempre lo acompaña. En los cuerpos neutros, la carga negativa de los electrones se equilibra con la carga positiva de los protones en el núcleo atómico.

Los protones, que se encuentran en el núcleo de los átomos, tienen carga positiva y no pueden moverse libremente. En los iones positivos, hay más protones que electrones, lo que provoca que estos iones busquen atraer electrones. En cambio, un ión negativo posee más electrones que protones, generando una tendencia a repeler otros electrones.

2.2.2 Campo eléctrico entre cuerpos cargados

Entre dos esferas cargadas se crean líneas invisibles de fuerza eléctrica que provocan el movimiento de los electrones libres desde la esfera con carga negativa hacia la positiva. La intensidad de esta fuerza depende de la cantidad de carga en cada esfera y de la distancia entre ellas, disminuyendo a medida que se alejan (figura 2). La energía utilizada para cargar la esfera negativa se almacena como energía potencial en los electrones desplazados, la cual puede liberarse cuando

regresan a la esfera positiva realizando trabajo. La fuerza electromotriz (FEM), que impulsa este movimiento de electrones, se mide en voltios (o volts), en honor a Alessandro Volta, pionero en el estudio de la electricidad. En términos técnicos, a la FEM también se le llama voltaje.

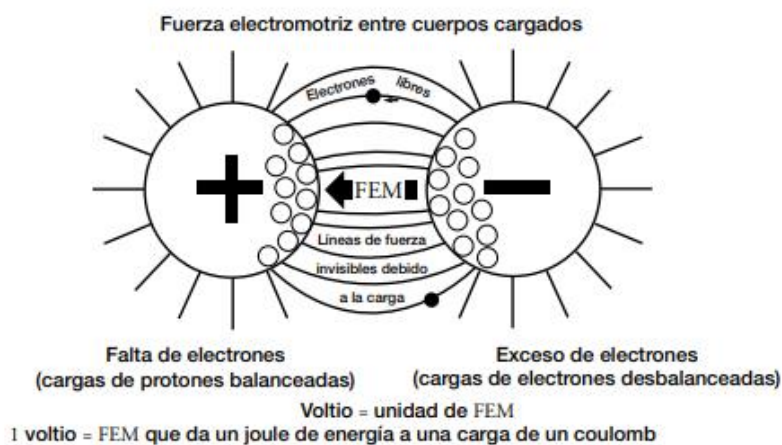


Figura 2 Fuerza electromotriz entre cuerpos cargados [38]

2.2.3 Electricidad y magnetismo

En 1819, el físico danés Hans Christian Oersted descubrió que una corriente eléctrica genera un campo magnético capaz de afectar objetos de hierro cercanos. Su experimento consistía en conectar un cable de cobre a una pila y colocarlo sobre una brújula. Al cerrar el circuito y permitir el paso de corriente, la aguja de la brújula se desvió, demostrando que la corriente produce un campo magnético.

Esta desviación no fue causada por el cable, ya que el cobre no es magnético, sino por el flujo de electrones a través del conductor. Así, Oersted comprobó que la corriente eléctrica genera una fuerza magnética, fenómeno conocido como electromagnetismo.

Si se repite el experimento pasando el cable por una cartulina con limaduras de hierro, las partículas se alinean formando círculos concéntricos alrededor del conductor. Esto revela que el campo magnético rodea al cable y sus líneas de fuerza son perpendiculares a la corriente, siguiendo la dirección del flujo de electrones.

2.2.3.1 Parámetros eléctricos, definición, analogías y unidades

Voltaje

Para que los electrones se mantengan en movimiento, es necesario aplicar una fuerza o presión eléctrica, conocida como fuerza electromotriz (FEM) o voltaje. Esta fuerza surge de la diferencia de carga eléctrica entre dos puntos: un lugar con exceso de electrones y otro con déficit.

El voltaje representa la energía necesaria para mover una carga entre esos dos puntos dentro de un circuito o campo eléctrico, y se mide en voltios (V). Para conocer este valor se utiliza un voltímetro, que debe conectarse en paralelo al circuito.

En fórmulas y diagramas eléctricos, el voltaje se suele denotar con las letras E o V, y también puede llamarse tensión, potencial eléctrico o fuerza electromotriz (FEM).

Corriente eléctrica

La corriente eléctrica es el movimiento constante y controlado de electrones a través de un circuito. Al conectar una fuente de voltaje a un dispositivo mediante conductores, las cargas se desplazan de un polo al otro, generando este flujo llamado corriente.

La intensidad de corriente se define como la cantidad de carga que pasa por un punto en cierto tiempo y se mide en coulombs por segundo, unidad conocida como ampere (A) o amperio.

Corriente directa

La corriente directa (CD) o corriente continua, ver figura 3, se caracteriza porque los electrones fluyen siempre en la misma dirección, debido a que la polaridad de la fuente de voltaje no cambia: un polo es siempre positivo y el otro negativo.

En este tipo de corriente, los electrones salen del polo negativo, recorren el circuito y regresan al polo positivo de la fuente. Ejemplos comunes de fuentes de corriente continua son las pilas, baterías de autos, generadores de CD y rectificadores.

Corriente alterna

La corriente alterna (CA) es un tipo de corriente en la que la polaridad se invierte de forma periódica. La fuente de CA genera un voltaje que cambia constantemente: sube de cero a un valor máximo positivo, vuelve a cero, baja hasta un máximo negativo y regresa a cero. A esta secuencia completa se le conoce como ciclo, ver figura 3.

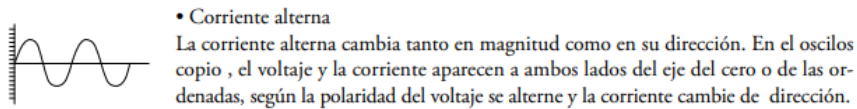


Figura 3 Corriente alterna [38]

Inducción electromagnética

La corriente alterna (ca) se produce gracias a la inducción electromagnética, un fenómeno donde un campo magnético genera una fuerza electromotriz (FEM) en un conductor sin necesidad de contacto físico. Esto ocurre cuando el conductor se mueve a través del campo magnético o cuando el campo se desplaza alrededor del conductor, induciendo un voltaje.

Al formar parte de un circuito, este voltaje hace que la corriente fluya. Los generadores funcionan con este principio, convirtiendo el movimiento rotatorio en corriente eléctrica al girar una bobina dentro de un campo magnético. De igual forma, los motores de corriente alterna aprovechan la inducción electromagnética para transformar la electricidad en movimiento [38].

Onda sinusoidal de ca

La rotación de un imán frente a una bobina origina en ésta una corriente alterna. La corriente eléctrica inducida obtenida tiene una forma llamada sinusoidal. El voltaje y corriente alternas producidos por el movimiento rotatorio de un generador asumen la forma de una onda o curva sinusoidal: ésta es la forma más común de voltaje y

corriente alterna. Cuando el conductor gira dentro de un campo magnético, corta, según una proporción variable, las líneas magnéticas de fuerza. En consecuencia, de lo anterior, el voltaje varía según un esquema regular y repetitivo, ver figura 4.

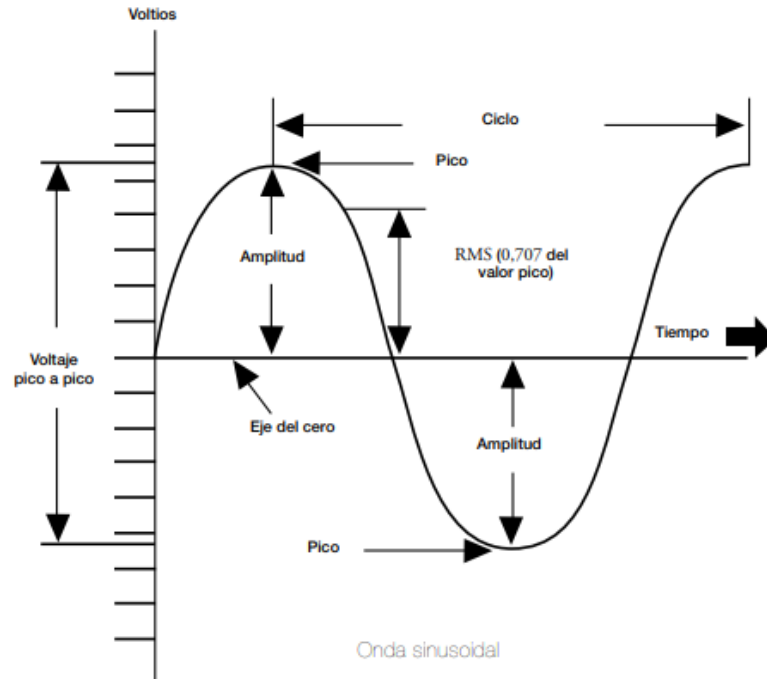


Figura 4 Onda sinusoidal de la corriente eléctrica inducida en una bobina [38]

La ecuación general de una onda sinusoidal que incluye amplitud, frecuencia y fase es la siguiente **(18)**:

$$y(t) = A(\sin(2\pi ft + \varphi)) \quad (18)$$

Donde:

$y(t)$: Valor instantáneo de la onda en el tiempo t

A : Amplitud máxima de la onda (valor pico)

f : Frecuencia de la onda en Hertz (Hz), que indica cuántos ciclos ocurren por segundo

t : Tiempo

φ : Ángulo de fase en radianes, que determina el desplazamiento horizontal de la onda

También puede expresarse en función de la frecuencia angular (ω), donde $\omega = 2\pi$

f :

$$y(t) = A(\sin(\omega t + \varphi)) \quad (19)$$

La ecuación **(19)** describe cualquier señal senoidal, como el voltaje o la corriente alterna, e incorpora todos los parámetros fundamentales de la onda.

Las ondas sinusoidales se analizan y comparan mediante varias características:

1. Amplitud: Representa el valor máximo de corriente o voltaje, tanto en la parte positiva como en la negativa de la onda.
2. Ciclo: Es una repetición completa de la forma de la onda, equivalente a 360° de rotación del conductor en un campo magnético. Cada ciclo incluye dos cambios de dirección y dos valores máximos: alcanza su pico positivo a los 90°, cruza el cero a los 180°, llega al pico negativo a los 270° y vuelve a cero en los 360°.
3. Frecuencia: Indica cuántos ciclos ocurren por segundo y se mide en Hertz (Hz). A mayor frecuencia, más ciclos por segundo y menos duración por ciclo. Generalmente, la corriente alterna opera a 50 o 60 Hz. Voltaje pico a pico: Es la diferencia entre el máximo positivo y el máximo negativo de la onda, y equivale al doble de la amplitud.
4. Valor RMS (Raíz Media Cuadrática): Es un promedio estándar para medir corriente o voltaje en AC, calculado como 0.707 veces el valor pico.
5. Eje de cero: Es la línea central de la onda. Los valores por encima de este eje son positivos y los que están por debajo son negativos.

Tanto la corriente y voltaje positivos como los negativos realizan el mismo trabajo; la única diferencia es la dirección del flujo y la polaridad.

Resistencia

Para que los electrones se desplacen con facilidad, necesitan un material que lo permita. La resistencia es la oposición que ofrece un material al paso de los electrones. En aislantes como la cerámica o el plástico, los electrones están fuertemente ligados a sus átomos y solo un voltaje muy alto puede liberarlos. En cambio, los conductores permiten el movimiento de electrones incluso con voltajes

bajos, aunque la cantidad de electrones en movimiento depende de la resistencia del material.

La resistencia puede compararse con la fricción: al igual que una bola pierde velocidad al rodar sobre una superficie áspera, los electrones pierden energía al superar la resistencia del material, transformándose en calor. Cada material ofrece diferente nivel de resistencia al flujo de corriente.

Factores que influyen en la resistencia:

1. Tipo de material: Algunos metales permiten el paso de electrones con poca oposición. Los que ofrecen menor resistencia son plata, cobre, oro y aluminio, en ese orden.
2. Longitud del conductor: A mayor longitud del alambre, mayor será la resistencia, ya que los electrones chocan más veces con los átomos, generando más calor y pérdida de energía (figura 5).

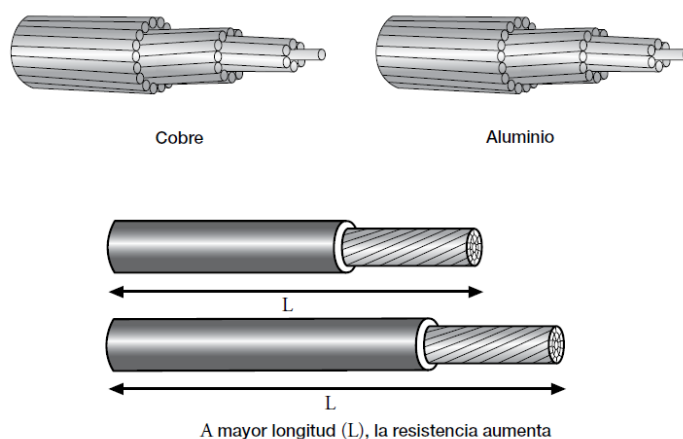


Figura 5 Longitud de un alambre y su resistencia [38]

3. Área de la sección transversal: Un cable más grueso ofrece menos resistencia porque permite que más electrones circulen al mismo tiempo. A mayor diámetro, menor resistencia.
4. Temperatura: Al aumentar la temperatura, los átomos del metal vibran más intensamente, lo que provoca más choques con los electrones en movimiento

y eleva la resistencia. Por eso, en los metales, la resistencia aumenta con la temperatura. La constante α varía según el material.

Resistencia en función de la longitud y el área:

$$R = \rho(L/A) \quad (20)$$

Donde:

R: Resistencia del conductor (Ohmios, Ω)

ρ : Resistividad del material ($\Omega \cdot m$)

L: Longitud del conductor (m)

A: Área de la sección transversal del conductor (m^2)

Efecto de la temperatura en la resistencia:

$$R_t = R_0[1 + \alpha(T - T_0)] \quad (21)$$

Donde:

R_t : Resistencia a la temperatura T ($^{\circ}C$)

R_0 : Resistencia a una temperatura de referencia T_0 ($^{\circ}C$)

α : Coeficiente de temperatura del material ($1/^{\circ}C$)

T: Temperatura final ($^{\circ}C$)

T_0 : Temperatura de referencia ($^{\circ}C$)

Medida de la resistencia

La resistencia siempre provoca una pérdida de energía en los electrones, la cual se transforma en calor. La cantidad de energía que transportan los electrones depende del voltaje o fuerza electromotriz (FEM) aplicada. Al atravesar una resistencia, los electrones pierden parte de esa energía, generando lo que se conoce como caída de voltaje.

Esta caída ocurre en cada resistencia del circuito y la suma de todas representa la pérdida total de voltaje. A partir de este concepto se define la unidad de resistencia, que es la cantidad que provoca una caída de 1 voltio cuando circula una corriente de 1 amperio. Esta unidad se llama ohmio (Ω), en honor al científico Georg Simon Ohm. La resistencia se mide con un óhmetro, conectándolo a ambos extremos del elemento a medir.

Relación entre voltaje, corriente y resistencia. Ley de Ohm

Cuando se aplica un voltaje a un circuito cerrado, se genera una corriente de electrones que recorre todo el circuito. La energía que el voltaje aporta a los electrones se convierte en calor al superar la resistencia, especialmente en la carga del circuito.

En 1827, el físico alemán Georg Simon Ohm formuló la relación exacta entre voltaje, corriente y resistencia, conocida como la Ley de Ohm. Esta ley es fundamental en electricidad, ya que permite calcular cómo se comportará un circuito antes de construirlo. Gracias a ella, los técnicos pueden determinar cuánta corriente circulará por una resistencia al conocer el voltaje aplicado, y también calcular cualquiera de estas tres variables si se conocen las otras dos **(20)** y **(21)**.

La ley de Ohm se expresa mediante la ecuación **(22)**:

$$V = IR \quad (22)$$

Donde:

V: Voltaje o diferencia de potencial (Voltios, V)

I: Corriente eléctrica (Amperios, A)

R: Resistencia eléctrica (Ohmios, Ω)

La Ley de Ohm establece que la corriente en un circuito es directamente proporcional al voltaje aplicado e inversamente proporcional a la resistencia. Si la resistencia se mantiene constante, al duplicar el voltaje en un circuito, la corriente también se duplica, haciendo que los electrones se desplacen más rápido. En general, cualquier aumento en el voltaje o la fuerza electromotriz (FEM) provoca un incremento proporcional en la corriente, mientras que una disminución reduce el flujo de electrones en la misma proporción.

2.2.3.2 Las ecuaciones de Maxwell: fundamento del electromagnetismo

Las ecuaciones de Maxwell representan uno de los pilares fundamentales de la física moderna, proporcionando una descripción matemática completa de los fenómenos electromagnéticos. Formuladas por James Clerk Maxwell en el siglo XIX, estas ecuaciones unificaron los campos eléctrico y magnético, estableciendo las bases para una comprensión integral del electromagnetismo clásico. Su importancia trasciende la física, encontrando aplicaciones en ingeniería, óptica, telecomunicaciones y muchas otras disciplinas.

Formulación Matemática

Las ecuaciones de Maxwell **(23), (24), (25), (26)** consisten en un conjunto de cuatro ecuaciones diferenciales que describen cómo los campos eléctricos y magnéticos interactúan entre sí y con la materia:

1. Ley de Gauss para el Campo Eléctrico:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho / \epsilon_0 \quad (23)$$

Esta ecuación establece que el flujo del campo eléctrico $\mathbf{E}$ a través de una superficie

cerrada es proporcional a la carga eléctrica q dentro de la superficie. ϵ_0 es la permitividad del vacío.

2. Ley de Gauss para el Campo Magnético:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (24)$$

Indica que no existen los monopolos magnéticos; el flujo neto del campo magnético $\mathbf{B}$ a través de cualquier superficie cerrada es cero.

3. Ley de Faraday de la Inducción:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t \quad (25)$$

Establece que un campo magnético variable en el tiempo induce un campo eléctrico.

4. Ley de Ampère -Maxwell:

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \partial \mathbf{E} / \partial t \quad (26)$$

Describe cómo los campos magnéticos son generados tanto por corrientes eléctricas $\mathbf{J}$ como por el cambio en el tiempo del campo eléctrico $\mathbf{E}$. μ_0 es la permeabilidad del vacío.

Interpretación Física

Las ecuaciones de Maxwell resumen los principios fundamentales del electromagnetismo:

- El campo eléctrico es generado por cargas eléctricas (Ley de Gauss).
- Los campos magnéticos no tienen fuentes puntuales equivalentes a las cargas eléctricas (Ley de Gauss para el magnetismo).
- Un campo magnético variable en el tiempo genera un campo eléctrico, y viceversa (Leyes de Faraday y Ampère-Maxwell).

Relevancia y Aplicaciones

Estas ecuaciones son esenciales para describir la propagación de las ondas electromagnéticas, prediciendo que estas viajan a la velocidad de la luz. Este

descubrimiento revolucionó nuestra comprensión de la naturaleza de la luz, al identificarla como una onda electromagnética.

En ingeniería, las ecuaciones de Maxwell son cruciales para el diseño de dispositivos como antenas, circuitos eléctricos y sistemas de comunicación. También son fundamentales en la teoría de la radiación, el análisis de materiales dieléctricos y conductores, y en la investigación de fenómenos ópticos.

Las ecuaciones de Maxwell no solo unificaron el estudio del electromagnetismo, sino que también establecieron un marco conceptual que allanó el camino para desarrollos posteriores, como la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica. Su elegancia y universalidad continúan siendo una inspiración en la búsqueda del conocimiento científico.

2.3 Transferencia de calor

La transferencia de calor es un fenómeno físico fundamental en múltiples procesos de ingeniería, incluido el fraguado del cemento, donde las reacciones exotérmicas liberan calor que influye directamente en la cinética del endurecimiento y las propiedades finales del material.

Existen tres mecanismos principales mediante los cuales se transfiere el calor:

2.3.1 Conducción

Es el proceso de transferencia de energía térmica a través de un material sólido, sin movimiento macroscópico de la materia. En el cemento y concreto, la conducción ocurre entre los granos de los materiales sólidos y es fundamental durante el fraguado y curado, donde la temperatura se distribuye hacia el interior de la masa.

2.3.2 Convección

Se refiere al transporte de calor debido al movimiento de un fluido (líquido o gas). En el caso del concreto expuesto al ambiente, la convección ocurre entre la superficie del material y el aire circundante, influenciando la velocidad de enfriamiento y, por lo tanto, el fraguado.

2.3.3 Radiación

Es la transferencia de energía en forma de ondas electromagnéticas. Aunque su efecto suele ser menor en el proceso de fraguado tradicional, puede tener relevancia en estudios donde se involucra el uso de láser o en la exposición del concreto a fuentes de calor radiantes.

La ecuación general de la conducción térmica en estado transitorio está dada por la Ley de Fourier:

$$q = -k \nabla T \quad (27)$$

Donde: q es el flujo de calor (W/m^2), k es la conductividad térmica del material ($W/m \cdot K$), ∇T es el gradiente de temperatura.

Durante el fraguado del cemento, la generación de calor es consecuencia de las reacciones de hidratación. Este calor puede acumularse dentro del concreto, elevando la temperatura interna y acelerando las reacciones, lo que a su vez puede provocar tensiones térmicas, fisuras y afectar la durabilidad si no se controla adecuadamente.

Por esta razón, el análisis de la transferencia de calor en pastas de cemento y concreto es esencial en proyectos de gran envergadura como presas y estructuras masivas, donde la acumulación de calor puede generar problemas estructurales. Modelos de simulación como los utilizados en esta investigación permiten predecir y controlar estos efectos térmicos durante el proceso de fraguado.

2.4 Softwares

A continuación, se describen las características principales de los simuladores a utilizar en el desarrollo de esta tesis.

2.4.1 COMSOL Multiphysics

COMSOL [39] es un software de ingeniería asistida por computadora (CAE) utilizado para modelar, analizar y simular fenómenos físicos en 3D, figura 6. Permite trabajar

en distintas áreas como fluidos, estructuras, térmica y electromecánica, entre otras. La plataforma ofrece herramientas para definir la geometría, configurar el mallado (mesh), aplicar cargas y visualizar los resultados antes de ejecutar el análisis completo. Posteriormente, permite realizar el postproceso y generar reportes. Además, COMSOL incluye diversos módulos o físicas que amplían sus capacidades de simulación.

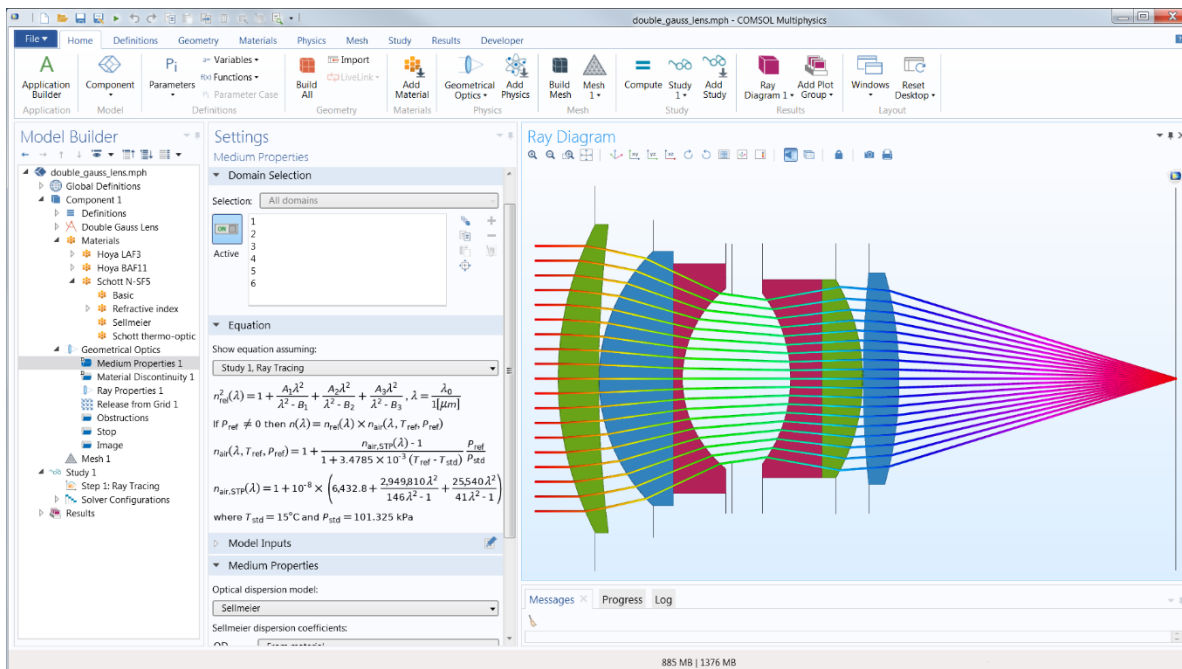


Figura 6 Simulación en COMSOL Multiphysics

2.4.1.1 COMSOL Chemical Engineering Module

Este módulo de COMSOL Multiphysics permite el modelado de procesos y equipos en ingeniería química. Ofrece herramientas para simular el transporte de masa, calor y momento junto con reacciones químicas en geometrías tridimensionales. Es útil en el diseño de reactores, catálisis heterogénea, dinámica de fluidos, filtración, diálisis, procesos electroquímicos como celdas de combustible, baterías, electrólisis, corrosión y control de procesos integrado con Simulink.

2.4.1.2 COMSOL Reaction Engineering Lab

Herramienta especializada para modelar y simular sistemas químicos complejos. Permite ingresar ecuaciones de reacciones químicas y balances de materia y

energía, resolviéndolos automáticamente. Es aplicable en áreas como bioingeniería, farmacéutica, química ambiental y procesos industriales.

2.4.1.3 COMSOL Material Library

Base de datos con información de más de 2,500 materiales, incluyendo sus propiedades, disponible para su uso dentro de COMSOL Multiphysics.

2.4.1.4 COMSOL Structural Mechanics Module

Módulo de análisis estructural por elementos finitos. Facilita el estudio de deformaciones y esfuerzos en modelos 2D y 3D con distintos materiales, ideal para aplicaciones en diseño mecánico estructural.

2.4.1.5 COMSOL Heat Transfer Module

Herramienta para resolver fenómenos térmicos como conducción, convección y radiación, incluyendo su integración con otros módulos de COMSOL. Es ampliamente utilizado en el análisis térmico de dispositivos electrónicos, biomédicos, hornos, intercambiadores de calor, procesos de soldadura y fricción, entre otros.

2.4.1.6 COMSOL RF Module

Diseñado para simular fenómenos de radiofrecuencia, microondas y óptica. Permite modelar antenas, guías de ondas y componentes electromagnéticos en 3D, e incluye herramientas de post-procesamiento para analizar la propagación de ondas.

2.4.2 Aspen Plus

Aspen Plus es un simulador de procesos ampliamente utilizado en la industria química, petroquímica, refinación, generación de energía, tratamiento de gas, y sectores de metales, minerales, papel y pulpa. Funciona principalmente bajo un esquema modular y secuencial, aunque en sus versiones más recientes también

incorpora el enfoque basado en ecuaciones, lo que amplía su capacidad de resolución y permite el modelado de sistemas altamente complejos y acoplados.

Este software es capaz de representar procesos continuos y por lotes, modelando el flujo de materiales y energía entre diversas unidades de operación, como reactores, columnas de destilación, intercambiadores de calor, separadores, bombas, compresores y secadores, entre otros. Esta capacidad lo convierte en una herramienta esencial tanto en la etapa de diseño como en la optimización y análisis de plantas industriales.

Aspen Plus se distingue por su extensa base de datos de componentes puros, mezclas complejas, electrolitos e iones, lo que le permite abordar con precisión desde sistemas simples hasta aquellos con múltiples fases y reacciones químicas simultáneas. Además, integra una amplia gama de modelos termodinámicos (NRTL, UNIQUAC, Peng-Robinson, SRK, entre otros) que permiten predecir con exactitud las propiedades de los compuestos y las condiciones de equilibrio de fases.

Una de sus principales fortalezas es la posibilidad de realizar balances rigurosos de masa y energía, simulando de manera precisa los cambios en las condiciones de operación y analizando el impacto en el rendimiento de la planta. También incluye herramientas para la estimación de costos de inversión y operación, análisis de sensibilidad, estudios de factibilidad y optimización de procesos, lo que facilita la toma de decisiones técnicas y económicas durante la ingeniería de diseño.

Aspen Plus no solo permite trabajar con corrientes líquidas y gaseosas, sino que también ofrece módulos especializados para simular procesos que involucran sólidos. Esto resulta especialmente útil en industrias como la del cemento, minería, procesamiento de minerales y producción de fertilizantes, donde las operaciones con sólidos y mezclas heterogéneas son comunes. Dentro de este entorno es posible modelar procesos como trituración, molienda, transporte de sólidos y reacciones heterogéneas.

Otra ventaja destacada es su capacidad de integrarse con otras plataformas como Excel, MATLAB, Python y herramientas de control de procesos. Esto permite realizar simulaciones dinámicas, análisis de control y optimizaciones avanzadas que

amplían su alcance y funcionalidad dentro de los entornos industriales y de investigación.

La interfaz gráfica de Aspen Plus facilita la visualización de los procesos mediante diagramas de flujo detallados y la generación de informes automáticos, tablas y gráficos. Esto permite al usuario comprender el comportamiento de cada etapa del proceso, identificar cuellos de botella, evaluar alternativas de operación y proponer mejoras en el diseño.

En el ámbito académico y de investigación, Aspen Plus es ampliamente utilizado como plataforma de enseñanza en las carreras de ingeniería química, de procesos y ambiental, debido a su capacidad para representar y simular sistemas complejos de forma visual y detallada.

Por su robustez, flexibilidad y precisión, Aspen Plus se considera hoy en día una de las herramientas más potentes para la simulación de procesos industriales, permitiendo a los ingenieros analizar y optimizar operaciones de manera eficiente y segura, como se ejemplifica en la Figura 7.

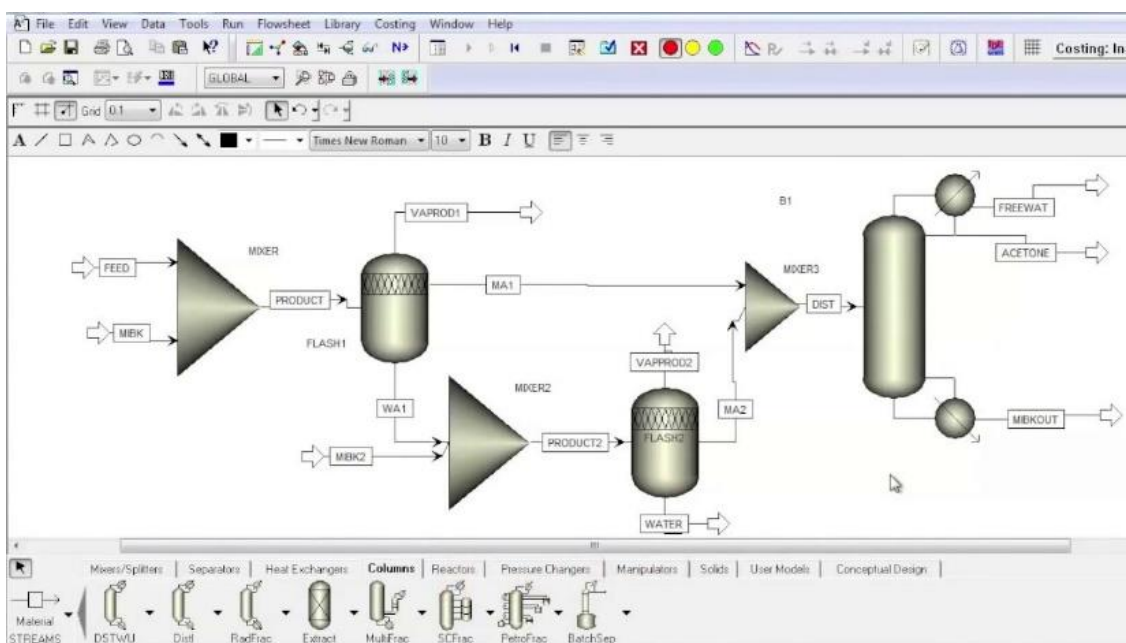


Figura 7 Diagrama de flujo de una simulación en Aspen Plus

2.4.2.1 Aplicaciones de Aspen Plus en la Industria del Cemento

En la industria del cemento, Aspen Plus se ha convertido en una herramienta de gran utilidad debido a la complejidad de los procesos involucrados, que combinan reacciones químicas, transferencia de calor y manejo de materiales sólidos y gaseosos. Entre sus aplicaciones más relevantes destacan:

- ✓ Modelado de reacciones de clinkerización: Permite simular las reacciones químicas que ocurren en el horno rotatorio, desde la descarbonatación de la caliza hasta la formación de los compuestos del clinker.
- ✓ Análisis térmico y energético: Facilita el balance de energía en cada etapa del proceso, optimizando el uso de combustibles y evaluando la recuperación de calor en precalentadores y enfriadores.
- ✓ Evaluación de emisiones: Simula la formación de gases como CO_2 , SO_2 y NO_x , permitiendo evaluar estrategias para su reducción y cumplimiento de normativas ambientales.
- ✓ Manejo de materiales sólidos: Modela el comportamiento de los sólidos en operaciones como molienda, transporte, clasificación y almacenamiento.
- ✓ Análisis de procesos auxiliares: Se pueden simular sistemas de tratamiento de gases, generación de energía, y circuitos de refrigeración, integrando todo el proceso productivo de manera global.
- ✓ Simulación de procesos alternativos y uso de aditivos: Facilita el análisis de procesos que incorporan combustibles alternativos o materiales suplementarios como cenizas volantes o escorias.

Gracias a estas aplicaciones, Aspen Plus permite a la industria cementera identificar oportunidades de mejora, reducir costos operativos, aumentar la eficiencia energética y cumplir con estándares ambientales cada vez más exigentes.

Capítulo 3. Metodología

3.1 Simulación de la química del cemento en Aspen Plus

La simulación de procesos químicos se ha convertido en una herramienta fundamental para analizar y optimizar fenómenos complejos en la ingeniería de materiales. En el caso del fraguado del cemento Portland, comprender sus reacciones de hidratación y los compuestos que intervienen es clave para mejorar su desempeño y durabilidad en aplicaciones constructivas. A través del software Aspen Plus, es posible modelar este proceso químico, permitiendo evaluar de forma detallada cada etapa y los productos generados durante la hidratación. A continuación, se presenta el desarrollo del modelo de simulación que representa las principales reacciones involucradas en el fraguado del cemento, así como la metodología utilizada para definir los componentes, parámetros y condiciones de operación.

3.1.1 Desarrollo del modelo de simulación para el proceso de fraguado del cemento

Introducción de componentes

El software de simulación AspenPlus® V11 permite seleccionar diversas plantillas acordes al proceso que deseamos imitar, lo cual se muestra en la figura 8.

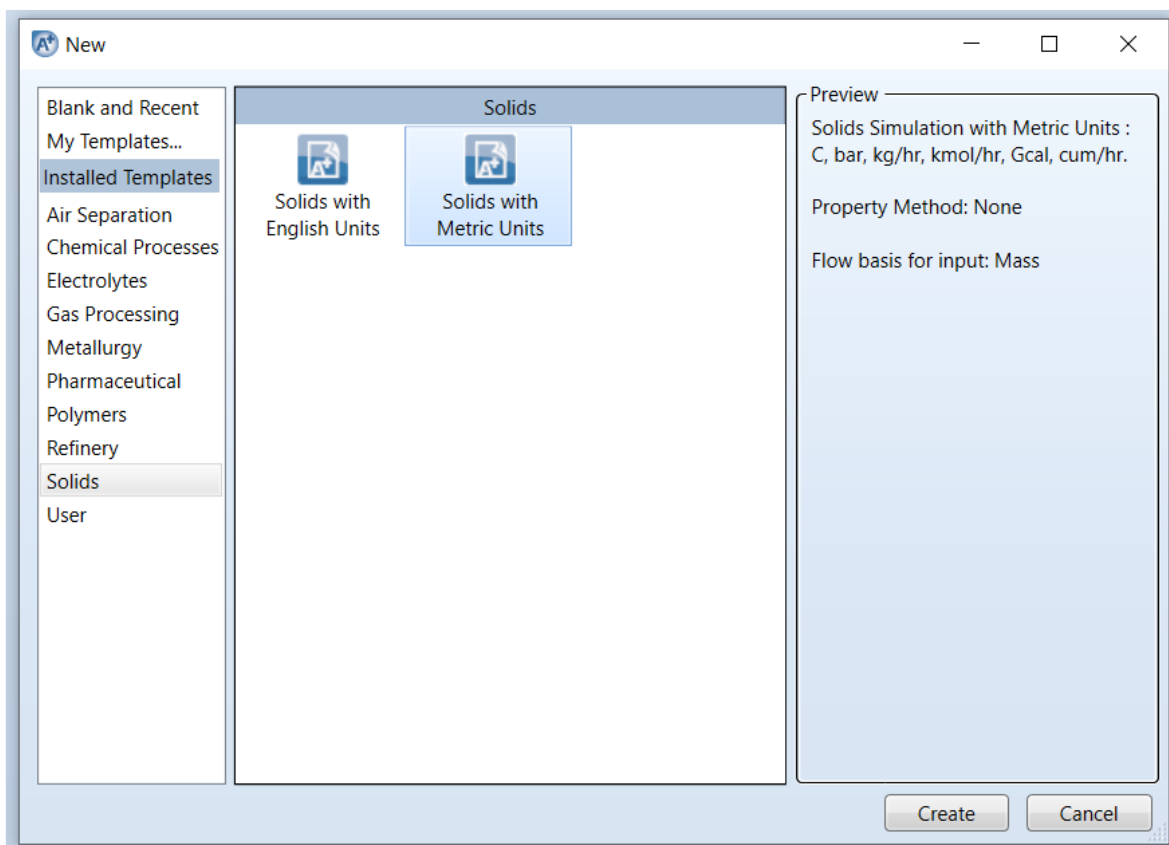


Figura 8 Plantilla para usar durante la simulación en AspenPlus®

Una vez seleccionada la plantilla “Solids with Metric Units”, como se muestra en la figura 8, se redirige hacia la pantalla principal de introducción de datos de componentes, dentro del ambiente de propiedades.

Para poder simular el proceso de fraguado del cemento portland tipo I, primeramente, se definieron los componentes que constituyen a este cemento: C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF y $CaSO_4 \cdot 2H_2O$. Dado que son compuestos sólidos complejos, su nomenclatura dentro de la base de datos del simulador es ligeramente diferente, sin embargo, no es algo que deba afectar el posterior análisis de la mezcla.

Select components

Component ID	Type	Component name	Alias
C3S	Solid	TRICALCIUM-SILICATE	CA3SIO5
C2S	Solid	OLIVINE	CA2SIO4
C3A	Solid	(CAO)3*AL2O3	CA3AL2O6
C4AF	Solid	CAO*FE2O3	CAO*FE2O3
YESO-2W	Solid	CALCIUM-SULFATE-DIHYDRAT...	CASO4*2H2O

Find Elec Wizard SFE Assistant User Defined Reorder Review

Figura 9 Introducción de los componentes del cemento

El tipo de compuesto se cambió a “Sólido” y se definieron los identificadores de cada componente con la misma abreviatura cementera, figura 9.

En la primera clasificación propuesta de reacciones de hidratación, que corresponde a las reacciones deseadas, todos los componentes involucrados se encontraban en la base de datos de AspenPlus®, y se introdujeron en el simulador con su respectivo identificador, figura 10.



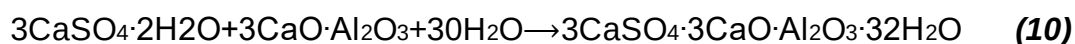
Component ID	Type	Component name	Alias
C3S	Solid	TRICALCIUM-SILICATE	CA3SIO5
C2S	Solid	OLIVINE	CA2SIO4
C3A	Solid	(CAO)3*AL2O3	CA3AL2O6
C4AF	Solid	CAO*FE2O3	CAO*FE2O3
YESO-2W	Solid	CALCIUM-SULFATE-DIHYDRAT...	CASO4*2H2O
TOBER	Solid	5-CALCIUM-6-SILICATE-3-HYD...	CA5SI6O17*3W
PORT	Solid	CALCIUM-HYDROXIDE	CA(OH)2
CO2	Conventional	CARBON-DIOXIDE	CO2
CACO3	Solid	CALCIUM-CARBONATE-CALCITE	CACO3
AGUA	Conventional	WATER	H2O

Find Elec Wizard SFE Assistant User Defined Reorder Review

Figura 10 Introducción de los componentes de las reacciones de hidratación deseadas

Debido a que algunos de los complejos minerales sólidos involucrados en las reacciones de hidratación no están presentes en la base de datos de AspenPlus®, se optó por realizar “conglomerados” de dichos compuestos complejos.

Por ejemplo, en la reacción de hidratación **(10)** dentro de la clasificación de reacciones controladas:



se sabe que el yeso dihidratado, el agua, y C3A funcionan como reactivos para producir ettringita, y al observar la fórmula química de este producto es notable la simple unión de estos compuestos. Es decir, la ettringita se compone de yeso, de C3A y de 32 moles de agua, de los cuales, 2 moles pertenecían al yeso dihidratado.

Siguiendo esta observación, se introdujeron los componentes de la ettringita “por separado”, figura 11.

Select components

Component ID	Type	Component name	Alias
C3S	Solid	TRICALCIUM-SILICATE	CA3SIO5
C2S	Solid	OLIVINE	CA2SIO4
C3A	Solid	(CAO)3*AL2O3	CA3AL2O6
C4AF	Solid	CAO*FE2O3	CAO*FE2O3
YESO-2W	Solid	CALCIUM-SULFATE-DIHYDRAT...	CASO4*2H2O
TOBER	Solid	5-CALCIUM-6-SILICATE-3-HYD...	CA5SI6O17*3W
PORT	Solid	CALCIUM-HYDROXIDE	CA(OH)2
CO2	Conventional	CARBON-DIOXIDE	CO2
CACO3	Solid	CALCIUM-CARBONATE-CALCITE	CACO3
AGUA	Conventional	WATER	H2O
C3A-E	Solid	(CAO)3*AL2O3	CA3AL2O6
YESO-E	Solid	CALCIUM-SULFATE	CASO4
AGUA-E	Conventional	WATER	H2O

Find Elec Wizard SFE Assistant User Defined Reorder Review

Figura 11 Introducción de la ettringita en el simulador como “conglomerado”

Los tres compuestos se representaron con “-E”, y la unión de ellos debería arrojar datos cuantitativos de la ettringita al término de la simulación, como se muestra en la figura 12.

El mismo método se replicó con el monosulfoaluminato cálcico, cuyos componentes se representaron con “-M”, y con el aluminato tetracálcico, representado con “-A” y C4A.

Select components

Component ID	Type	Component name	Alias
▶ C3S	Solid	TRICALCIUM-SILICATE	CA3SI05
▶ C2S	Solid	OLIVINE	CA2SI04
▶ C3A	Solid	(CAO)3*AL2O3	CA3AL2O6
▶ C4AF	Solid	CAO*FE2O3	CAO*FE2O3
▶ YESO-2W	Solid	CALCIUM-SULFATE-DIHYDRAT...	CASO4*2H2O
▶ TOBER	Solid	5-CALCIUM-6-SILICATE-3-HYD...	CA5SI6O17*3W
▶ PORT	Solid	CALCIUM-HYDROXIDE	CA(OH)2
▶ CO2	Conventional	CARBON-DIOXIDE	CO2
▶ CACO3	Solid	CALCIUM-CARBONATE-CALCITE	CACO3
▶ AGUA	Conventional	WATER	H2O
▶ C3A-E	Solid	(CAO)3*AL2O3	CA3AL2O6
▶ YESO-E	Solid	CALCIUM-SULFATE	CASO4
▶ AGUA-E	Conventional	WATER	H2O
▶ C3A-M	Solid	(CAO)3*AL2O3	CA3AL2O6
▶ YESO-M	Solid	CALCIUM-SULFATE	CASO4
▶ AGUA-M	Solid	WATER	H2O
▶ C4A	Solid	(CAO)4*AL2O3	CA4AL2O7
▶ AGUA-A	Conventional	WATER	H2O
▶			

Find Elec Wizard SFE Assistant User Defined Reorder Review

Figura 12 Introducción de los componentes de las reacciones de hidratación controladas

El método se repitió una última vez para introducir los componentes de las reacciones no deseadas, siendo la terminación “-SC” sulfato de calcio y “-EX” ettringita expansiva.

Además, se definieron componentes de agua y yeso que imitan la disociación de los 2 moles de agua contenidos en el yeso dihidratado y en el sulfato cálcico, para cada caso donde este componente estuvo presente, siendo los identificadores

“YESO-S”, “AGUA-S”, y “AGUA-Y” los compuestos resultantes de estas disociaciones, figura 13.

Select components

Component ID	Type	Component name	Alias
AGUA	Conventional	WATER	H2O
TOBER	Solid	5-CALCIUM-6-SILICATE-3-HYD...	CA5SI6O17*3W
PORT	Solid	CALCIUM-HYDROXIDE	CA(OH)2
C2S	Solid	OLIVINE	CA2SIO4
CO2	Conventional	CARBON-DIOXIDE	CO2
CACO3	Solid	CALCIUM-CARBONATE-CALCITE	CACO3
C3A	Solid	(CAO)3*AL2O3	CA3AL2O6
YESO-2W	Solid	CALCIUM-SULFATE-DIHYDRAT...	CASO4*2H2O
C4AF	Solid	CAO*FE2O3	CAO*FE2O3
YESO-E	Solid	CALCIUM-SULFATE	CASO4
C4A	Solid	(CAO)4*AL2O3	CA4AL2O7
VAPOR	Conventional	WATER	H2O
AGUA-E	Conventional	WATER	H2O
C3A-E	Solid	(CAO)3*AL2O3	CA3AL2O6
AGUA-A	Conventional	WATER	H2O
AGUA-Y	Conventional	WATER	H2O
YESO-M	Solid	CALCIUM-SULFATE	CASO4
AGUA-M	Conventional	WATER	H2O
YESO	Solid	CALCIUM-SULFATE	CASO4
C3A-M	Solid	(CAO)3*AL2O3	CA3AL2O6
SULFITO	Solid	SULFUR-TRIOXIDE	O3S
AC.SULF	Solid	SULFURIC-ACID	H2SO4
YESO-SC	Solid	CALCIUM-SULFATE-DIHYDRAT...	CASO4*2H2O
YESO-EX	Solid	CALCIUM-SULFATE	CASO4
AGUA-EX	Conventional	WATER	H2O
C3A-EX	Solid	(CAO)3*AL2O3	CA3AL2O6
CAL	Solid	CALCIUM-OXIDE	CAO
HDX-CA	Solid	CALCIUM-HYDROXIDE	CA(OH)2
MAGNESIA	Solid	MAGNESIUM-OXIDE	MGO
HDX-MG	Solid	MAGNESIUM-HYDROXIDE	MG(OH)2
YESO-S	Solid	CALCIUM-SULFATE	CASO4
AGUA-S	Conventional	WATER	H2O

Find Elec Wizard SFE Assistant User Defined Reorder Review

Figura 13 Introducción de todos los componentes de las reacciones de hidratación

Introducción de métodos y parámetros

Una vez que fueron introducidos todos los componentes con sus respectivos identificadores, se introdujeron ciertos parámetros sobre algunos de ellos para completar información que AspenPlus® no poseía en su base de datos, figura 14. Para ello, se definió una lista de parámetros de nombre PURE-1 en la carpeta Methods>Parameters>Pure Components.

Pure component scalar parameters								
	Parameters	Units	Data set	Component	Component	Component	Component	Component
				CO2	MAGNESI	AC.SULF	SULFITO	
▶	DHSFRM	kJ/mol	1	-393.509		-811.32	-395.18	
▶	RKTZRA		1		0.06			
+								

Figura 14 Introducción de parámetros

El parámetro DHSFRM hace referencia a la entalpía de formación de sólido a 25°C, mientras que el parámetro RKTZRA hace referencia a la constante de Rackett para volúmenes molares. La constante de Rackett es un parámetro empírico utilizado en la ecuación de Rackett **(28)**, la cual permite estimar el volumen molar de líquidos puros en función de la temperatura, especialmente a la temperatura de saturación, se usa principalmente en simuladores de procesos y en modelos de propiedades termodinámicas para predecir volúmenes molares de líquidos donde no se cuenta con datos experimentales.

Ecuación de Rackett:

$$V_m = \left(R \frac{T_c}{P_c} \right) Z_{RA} \left[\sqrt[7]{(1 - T_r)^2} \right] \quad (28)$$

Donde:

V_m : Volumen molar del líquido (m³/mol o cm³/mol)

R : Constante de los gases (8.314 J/mol·K)

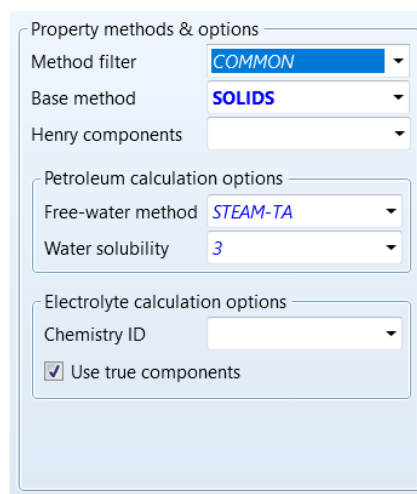
T_c : Temperatura crítica de la sustancia (K)

P_c : Presión crítica (Pa o bar)

Z_{RA} : Constante de Rackett (adimensional, específica para cada compuesto)

T_r : Temperatura reducida, definida como $\frac{T}{T_c}$

Para finalizar el ambiente de propiedades, se introdujo el método base de simulación, como se muestra en la figura 15:



Property methods & options

Method filter: COMMON

Base method: SOLIDS

Henry components: [dropdown]

Petroleum calculation options

Free-water method: STEAM-TA

Water solubility: 3

Electrolyte calculation options

Chemistry ID: [dropdown]

☒ Use true components

Figura 15 Método base de simulación

Ambiente de simulación

El ambiente de simulación se encuentra en la parte inferior izquierda, es llamado “Simulation”. En este apartado se definieron dos reactores estequiométricos con sus condiciones de operación, imitando de forma muy general un ambiente a temperatura ambiente. La composición del cemento y las propiedades de las reacciones de hidratación como la conversión y el reactivo limitante también se encuentran dentro de ellos.

El acomodo de equipos, líneas de alimentación y de salida, así como su nomenclatura, fue propuesta como se muestra en la figura 16.

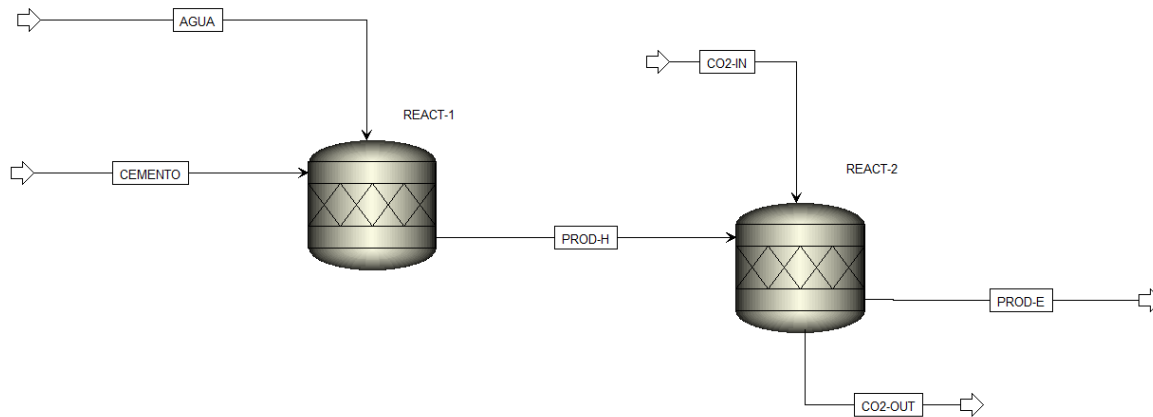


Figura 16 Diagrama del proceso de fraguado dentro del simulador

El hecho de usar dos reactores estequiométricos fue debido a que algunos compuestos son productos intermedios, encontrados en la línea “PROD-H”, que de otra forma no sería posible visualizar, aunque existe la posibilidad de realizar la simulación con un solo reactor estequiométrico a falta de información sobre ellos.

Las líneas “CEMENTO” y “AGUA” corresponden a la composición y cantidad del primero y a la cantidad del segundo. Además, las líneas de entrada y salida de CO₂ tratan de imitar el comportamiento del aire sobre la mezcla, obteniendo una línea de salida “PROD-E” que corresponde a la composición y propiedades del producto endurecido.

Parámetros de reactores estequiométricos

Ya que ambos reactores simulan el mismo ambiente, sus condiciones de operación fueron esencialmente idénticas, variando únicamente las reacciones de hidratación.

Operating conditions

Flash Type Temperature Pressure

Temperature 20 C

Pressure 1 atm

Duty Gcal/hr

Vapor fraction

Valid phases

Solid-Only

Figura 17 Condiciones de operación de los reactores estequiométricos

Se trató de simular un ambiente a temperatura ambiente, ya que son las condiciones a las que el fraguado se realiza comúnmente. Ya que el segundo reactor posee una línea adicional de salida para CO₂, se especifican las fases de cada corriente de salida, figuras 17 y 18.

Product streams

	Name	Phase
▶	PROD-E	Liquid
▶	CO ₂ -OUT	Vapor

Figura 18 Fases de corrientes a la salida del segundo reactor

Dado a que AspenPlus® no permite la selección de fase sólida en el producto endurecido, se decidió usar la fase líquida, advirtiendo que realmente el producto final es sólido.

Para digitalizar las reacciones de hidratación dentro de cada reactor, se realizaron las propuestas mostradas en las figuras 19 y 20.

Rxn No.	Fractional conversion	Fractional Conversion of Component	Stoichiometry
1		1 C3S	6 C3S(MIXED) + 16 AGUA(MIXED) --> TOBER(MIXED) + 13 PORT(MIXED)
2		1 C2S	6 C2S(MIXED) + 10 AGUA(MIXED) --> TOBER(MIXED) + 7 PORT(MIXED)
3		1 YESO-2W	YESO-2W(MIXED) --> YESO(MIXED) + 2 AGUA-Y(MIXED)
4		1 YESO	3 YESO(MIXED) + 2 AGUA-Y + C3A(MIXED) + 30 AGUA(MIXED) --> 3 YESO-E(MIXED) + C3A-E(MIXED) + 32 AGUA-E(MIXED)
5		1 SULFITO	SULFITO(MIXED) + AGUA(MIXED) --> AC.SULF(MIXED)
6		1 AC.SULF	AC.SULF(MIXED) + PORT(MIXED) --> YESO-SC(MIXED)
7		1 YESO-SC	YESO-SC(MIXED) --> YESO-S(MIXED) + 2 AGUA-S(MIXED)
8		1 YESO-S	3 YESO-S(MIXED) + 2 AGUA-S + C3A(MIXED) + 30 AGUA(MIXED) --> 3 YESO-EX(MIXED) + 32 AGUA-EX(MIXED) + C3A-EX(MIXED)

Figura 19 Reacciones de hidratación en el primer reactor

En total, se realizaron 8 reacciones dentro de este equipo, cuya representación y comportamiento fue definido en la tabla 6.

Tabla 6 Definición del comportamiento de las reacciones en el primer reactor

N° DE REACCIÓN	DEFINICIÓN
1	Se hidrata C3S produciendo tobermorita y portlandita
2	Se hidrata C2S produciendo tobermorita y portlandita
3	Se disocian los moles de agua contenidos en el yeso dihidratado
4	C3A y yeso (con sus moles de agua separados) se hidratan produciendo conglomerado de ettringita
5	El sulfito es hidratado produciendo ácido sulfúrico
6	El ácido sulfúrico reacciona con portlandita produciendo sulfato cálcico
7	Se disocian los moles de agua contenidos en el sulfato cálcico
8	C3A y el sulfato cálcico (con sus moles de agua separados) se hidratan produciendo conglomerado de ettringita expansiva

Cabe aclarar que se supuso una conversión del 100% para cada uno de los componentes de las reacciones de hidratación, además de que las reacciones ocurren en serie, lo cual se desconoce.

Rxn No.	Fractional conversion	Fractional Conversion of Component	Stoichiometry
1		0.2 C3A	PORT(MIXED) + 12 AGUA(MIXED) + C3A(MIXED) --> C4A(MIXED) + 13 AGUA-A(MIXED)
2		1 PORT	PORT(MIXED) + CO2(MIXED) --> CACO3(MIXED) + VAPOR(MIXED)
3		1 C3A	C3A-E(MIXED) + 3 YESO-E(MIXED) + 32 AGUA-E + 2 C3A(MIXED) + 4 AGUA(MIXED) --> 3 YESO-M(MIXED) + 3 C3A-M(MIXED) + 36 AGUA-M(MIXED)
4		1 CAL	4) CAL(MIXED) + AGUA(MIXED) --> HDX-CA(MIXED)
5		1 MAGNESIA	MAGNESIA(MIXED) + AGUA(MIXED) --> HDX-MG(MIXED)

Figura 20 Reacciones de hidratación en el segundo reactor

La representación y comportamiento de las 5 reacciones fue definido en la tabla 7.

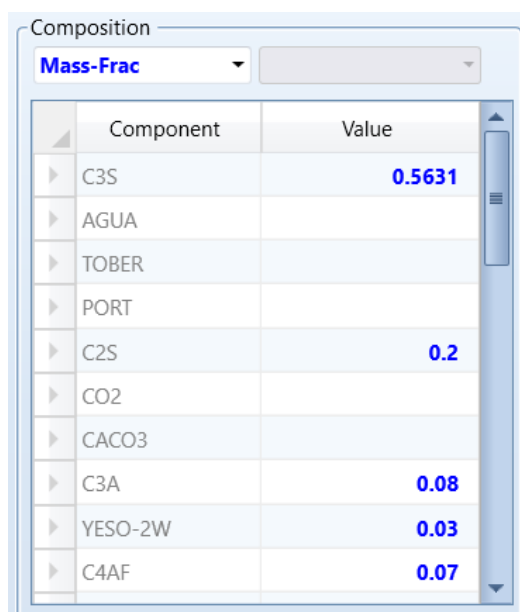
Tabla 7 Definición del comportamiento de las reacciones en el segundo reactor

N° DE REACCIÓN	DEFINICIÓN
1	El 20% de C3A y portlandita son hidratadas produciendo conglomerado de aluminato tetracálcico
2	La portlandita restante reacciona con CO ₂ atmosférico produciendo CaCO ₃ y vapor de agua
3	La ettringita y C3A restante se hidratan produciendo conglomerado de monosulfoaluminato cálcico
4	La cal libre se hidrata produciendo hidróxido de calcio
5	La magnesia se hidrata produciendo hidróxido de magnesio

Introducción de datos en líneas de alimentación

Se supuso una conversión del 20% de C3A para su reacción con portlandita, con base en los resultados presentados por el estudio del Dr. Tomás Vázquez Moreno sobre las reacciones de hidratación por espectroscopía infrarroja.

La composición del cemento se definió con base en los estudios realizados por Udo Ludwig en 1972 y Powers & Browyard en 1948 [40], además del análisis químico por espectroscopía infrarroja se muestran en las figuras 21 y 22.



Composition	
Mass-Frac	
Component	Value
▶ C3S	0.5631
▶ AGUA	
▶ TOBER	
▶ PORT	
▶ C2S	0.2
▶ CO2	
▶ CACO3	
▶ C3A	0.08
▶ YESO-2W	0.03
▶ C4AF	0.07

Figura 21 Composición, en fracción másica, de alita, belita, celita, ferrita y yeso en el cemento

Composition

Mass-Frac

Component	Value
SULFITO	0.03
AC.SULF	
YESO-SC	
YESO-EX	
AGUA-EX	
C3A-EX	
CAL	0.0122
HDX-CA	
MAGNESIA	0.0147
HDX-MG	

Total 1

Figura 22 Composición, en fracción másica, de sulfito, cal libre y magnesia en el cemento

Además de las condiciones a temperatura ambiente de las alimentaciones, se definió la relación agua/cemento como 0.5, de acuerdo con el estudio de concretos y morteros de 2001 por el Ing. Rodrigo Salamanca Correa [41], ver figura 23.

Specifications

Flash Type Temperature Pressure

State variables

Temperature 20 C

Pressure 1 atm

Vapor fraction

Total flow basis Mass

Total flow rate 300 kg/hr

Solvent

Figura 23 Cantidad de cemento en la alimentación al primer reactor

Specifications

Flash Type **Temperature** **Pressure**

State variables

Temperature **C**

Pressure **atm**

Vapor fraction

Total flow basis **Mass**

Total flow rate **kg/hr**

Solvent

Figura 24 Cantidad de agua en la alimentación al primer reactor

Specifications

Flash Type **Temperature** **Pressure**

State variables

Temperature **C**

Pressure **atm**

Vapor fraction

Total flow basis **Mass**

Total flow rate **kg/hr**

Solvent

Figura 25 Cantidad de CO_2 en la alimentación al segundo reactor

Una vez fueron introducidos todos los valores sobre los componentes, reacciones y condiciones de operación, la simulación se inició para obtener resultados y estimaciones del producto endurecido.

3.2 Simulación de campos magnéticos y transferencia de calor para muestras de cemento

En este trabajo se realizaron diversas simulaciones para analizar el efecto de la temperatura en muestras de cemento sometidas a la influencia de campos magnéticos. Las simulaciones fueron llevadas a cabo utilizando el software COMSOL Multiphysics, una herramienta de modelado diseñada para resolver problemas complejos de interacción entre diversos campos de la ingeniería.

Los resultados obtenidos a partir de las simulaciones fueron comparados con datos experimentales previamente recopilados, con el propósito de validar el modelo numérico desarrollado. Este enfoque permitió evaluar la precisión y la fiabilidad del modelo en la representación de los fenómenos físicos asociados, además de demostrar su potencial para futuras aplicaciones en el análisis de muestras de cemento bajo condiciones similares.

3.2.1 Una bobina de aire multicapa

Sin tubo intermedio

Se sabe que tanto la presencia de agua como su transporte desempeñan un papel clave en la determinación de la estructura de los poros, la resistencia mecánica y la durabilidad a largo plazo de los materiales hechos con cemento. En numerosos estudios, se ha llevado a cabo el tratamiento magnético del agua con el objetivo de mejorar las propiedades del cemento [20], [42], [26].

En este apartado se validaron algunas simulaciones con datos experimentales para comprobar la viabilidad de realizar algunos experimentos de manera computacional, con condiciones ambientales y añadiendo nuevos materiales que nos permitan tener una mejor visión de los experimentos futuros.

Como primera simulación se realizó un estudio de un tubo de cobre, el objetivo de este ejercicio es observar el efecto de los campos magnéticos en diferentes condiciones del experimento y algunos materiales.

A continuación, se muestra la secuencia de simulación y parámetros involucrados mediante COMSOL Multiphysics:

Al iniciar la simulación elegimos la física de campos magnéticos y el estudio de tipo estacionario (figura 26 y 27).

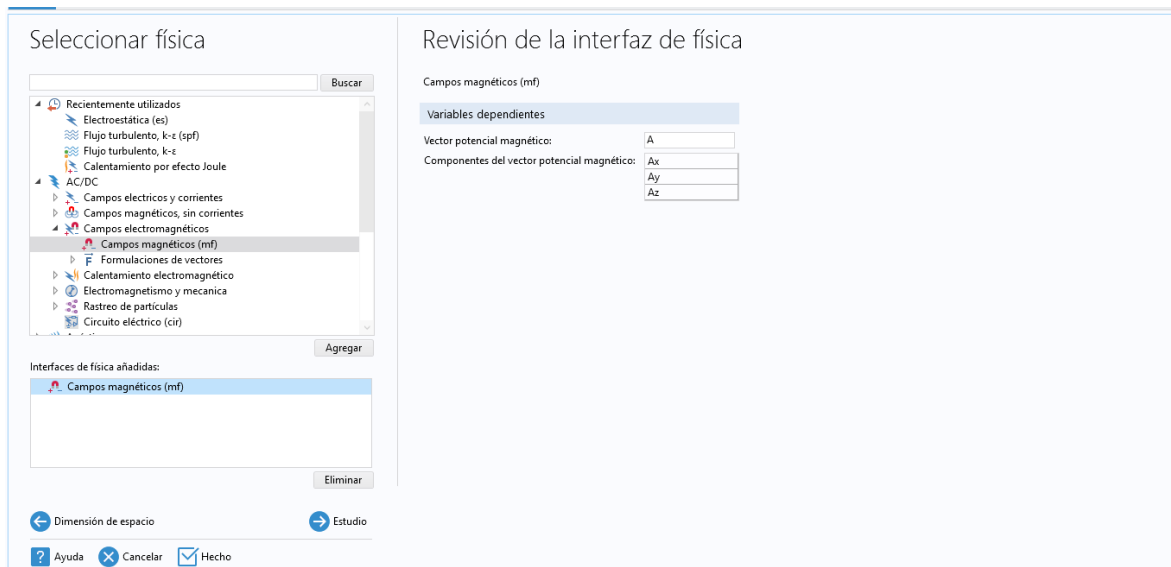


Figura 26 Selección de la física de campos magnéticos en COMSOL Multiphysics

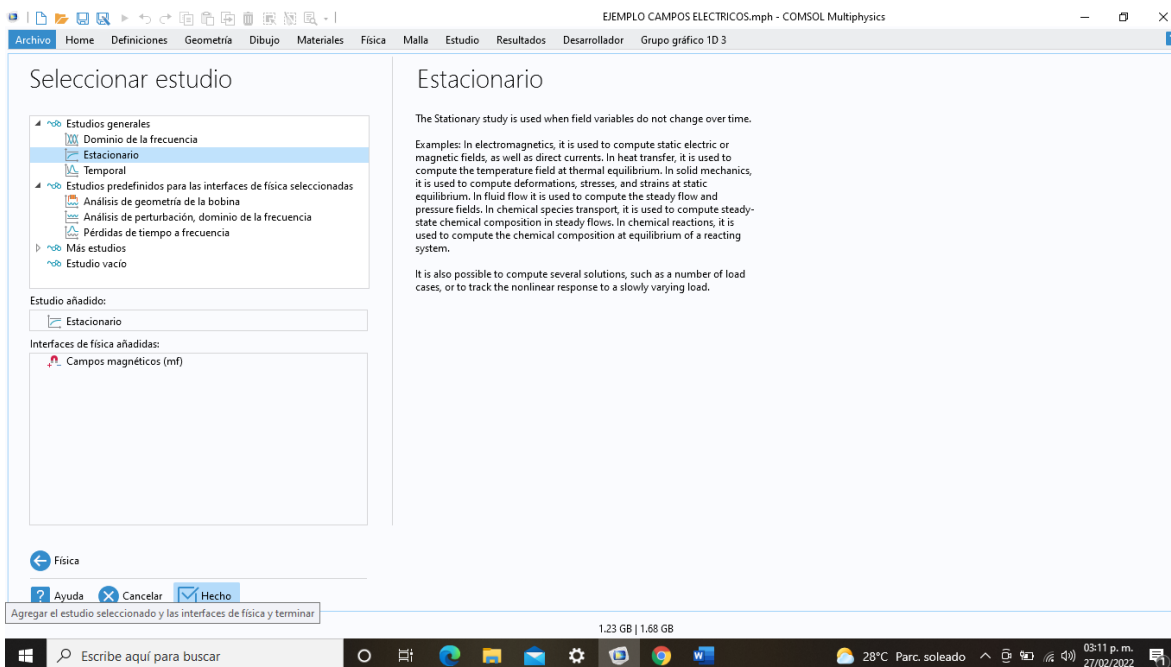


Figura 27 Selección de estudio tipo estacionario en COMSOL Multiphysics

Después en definiciones globales, se anexan los parámetros iniciales para poder trabajarlos en todo el sistema de una manera más práctica, y así poder modificar en caso necesario, los datos iniciales se muestran en la figura 28.

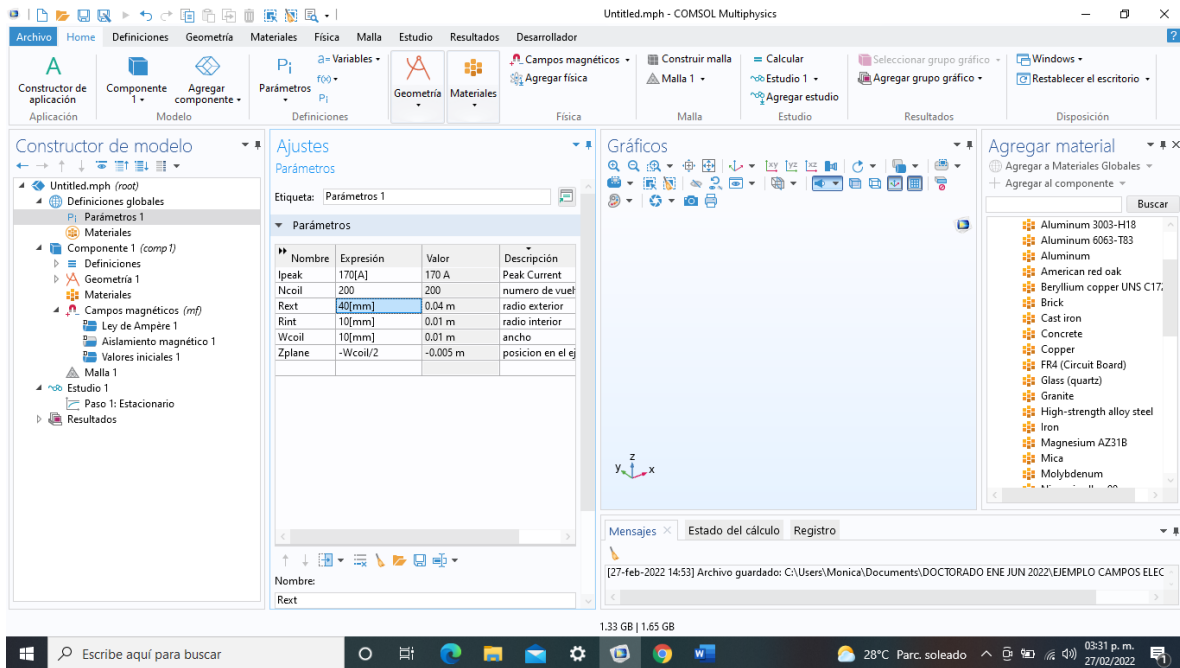


Figura 28 Ajustes de parámetros iniciales de una bobina de aire multicapa en COMSOL Multiphysics

Después de anexar los parámetros iniciales, se configura la geometría de estudio, en la figura 29 se muestra la construcción inicial de la geometría para una bobina de aire multicapa en COMSOL Multiphysics.

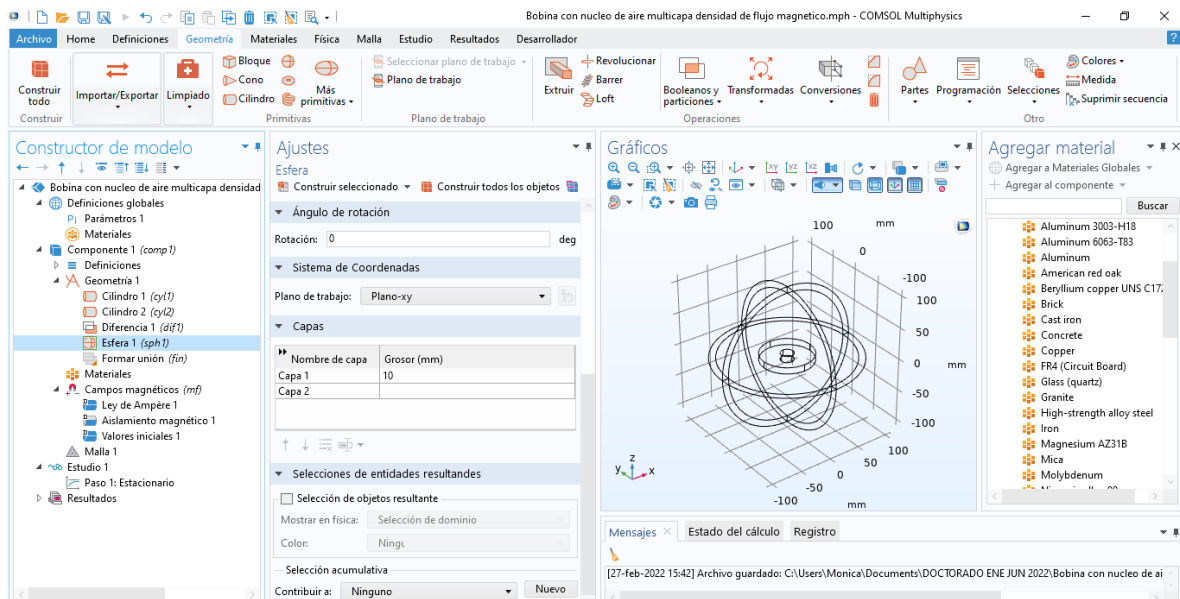


Figura 29 Configuración de la geometría para una bobina multicapa en COMSOL Multiphysics

Al final de la construcción de la geometría, el sistema marca que hay 10 dominios, por lo tanto, es necesario agruparlos para la configuración y selección de materiales. Es conveniente seleccionar o agrupar los dominios en este caso 4 secciones, para separar los materiales y las interfaces físicas de una manera más práctica (fig. 30).

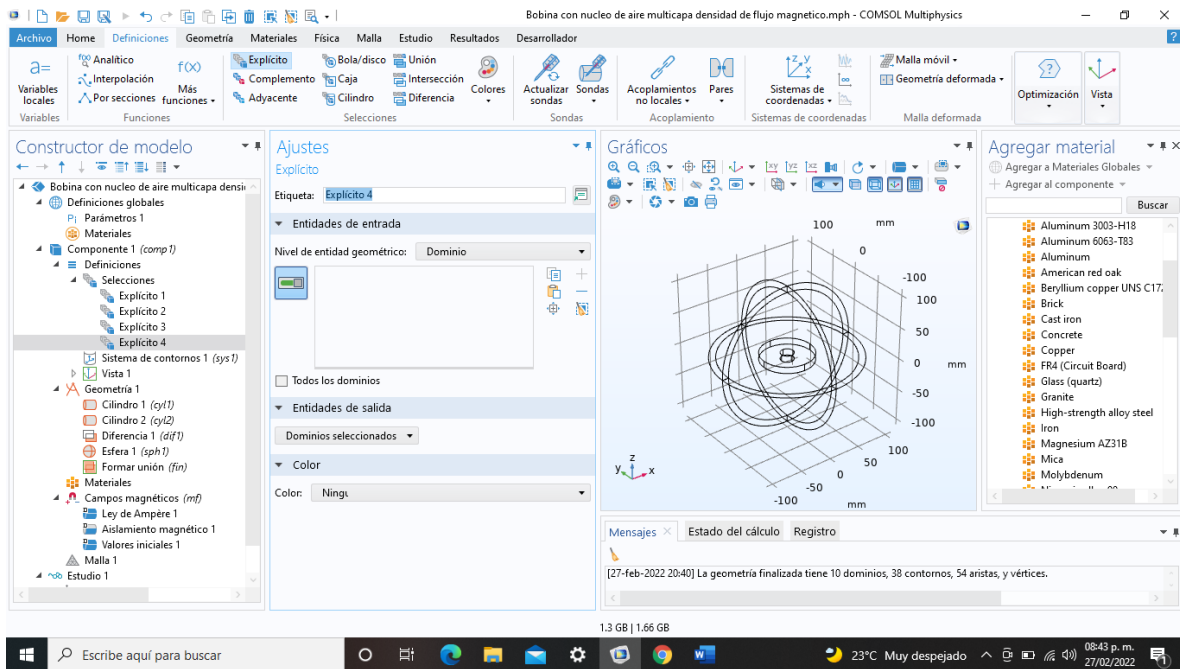


Figura 30 Agrupación de dominios en una geometría de una bobina de aire multicapa en COMSOL Multiphysics

Se renombran cada una de las secciones como *coil* (bobina), elementos finitos, elementos conductores y elementos no conductores (fig. 31).

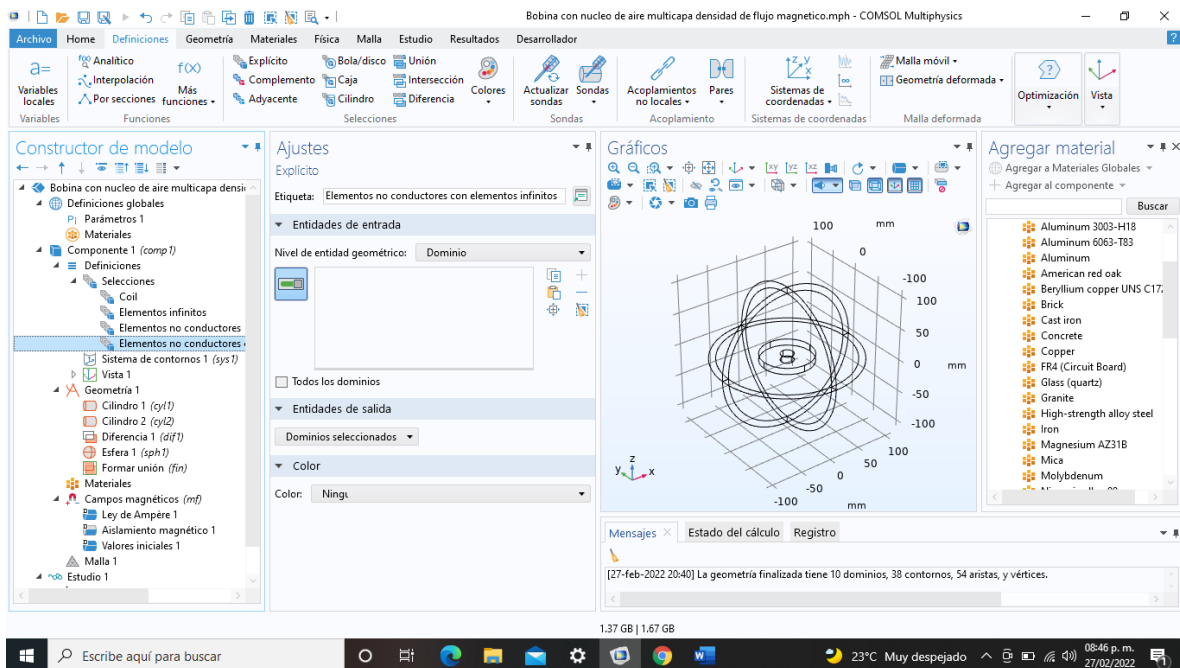


Figura 31 Secciones dentro de una geometría para una bobina de aire multicapa en COMSOL Multiphysics

Se configuran cada una de las secciones para que corresponda a la parte de la geometría especificada, para la sección de elementos infinitos se coloca la capa externa de la geometría (fig. 32), en la sección de elementos conductores se selecciona todas las partes de la geometría con excepción de la capa de aire (fig. 33), para los elementos no conductores se selecciona la capa de aire (fig. 34).

Después de esto se emula un espacio abierto infinito alrededor de la bobina, para esto se utiliza la función que está en la barra de definiciones llamada “dominio de elementos finitos”, esta herramienta también se puede observar en la ventana constructor de modelo. Se selecciona el dominio (elementos infinitos), ver figura 35 y 36. También se activa la geometría tipo esférica, y así ya se ha definido el espacio infinito alrededor de la bobina.

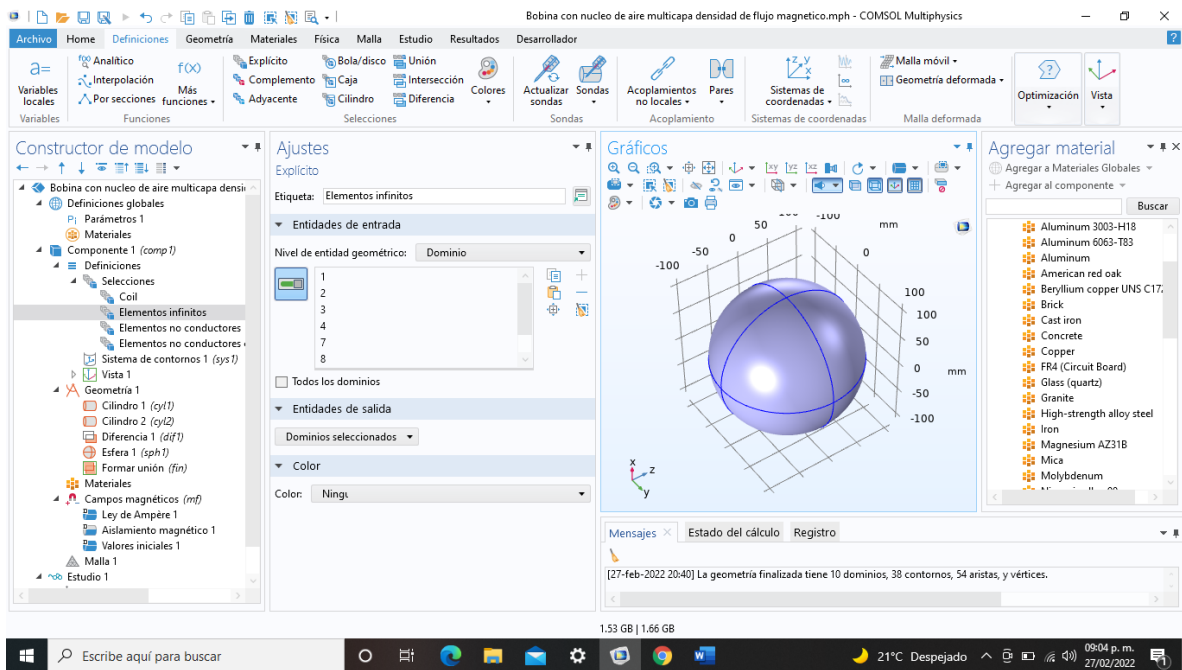


Figura 32 Sección de elementos infinitos para la geometría de una bobina de aire multicapa en COMSOL Multiphysics

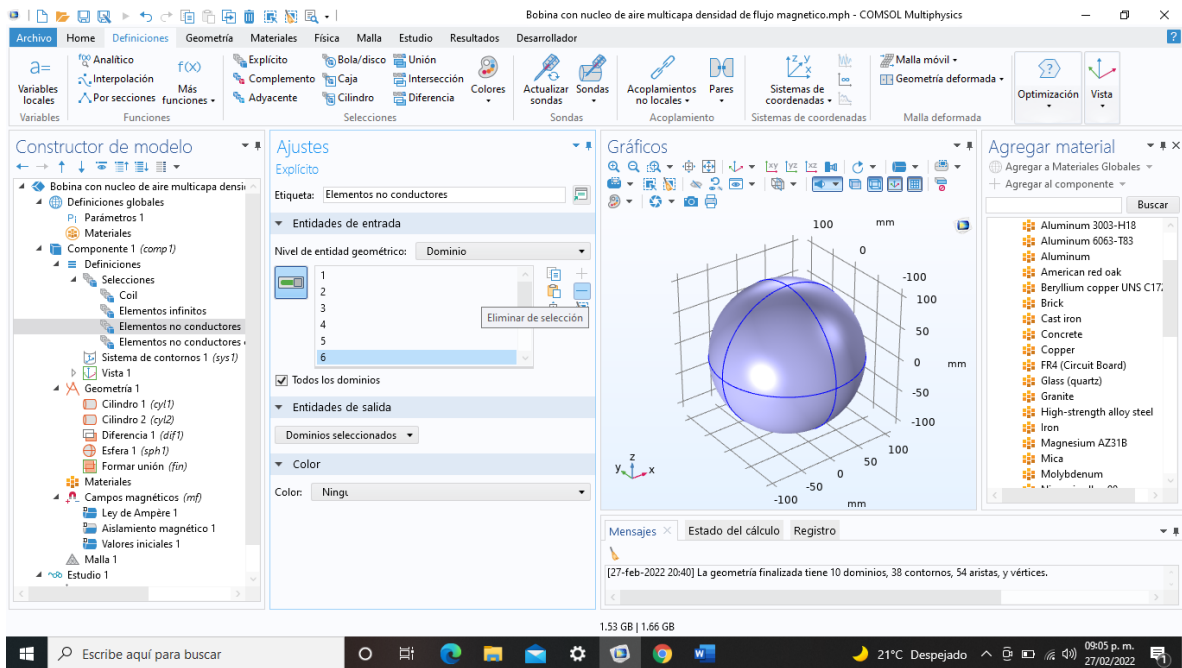


Figura 33 Sección de elementos conductores para la geometría de una bobina de aire multicapa en COMSOL Multiphysics

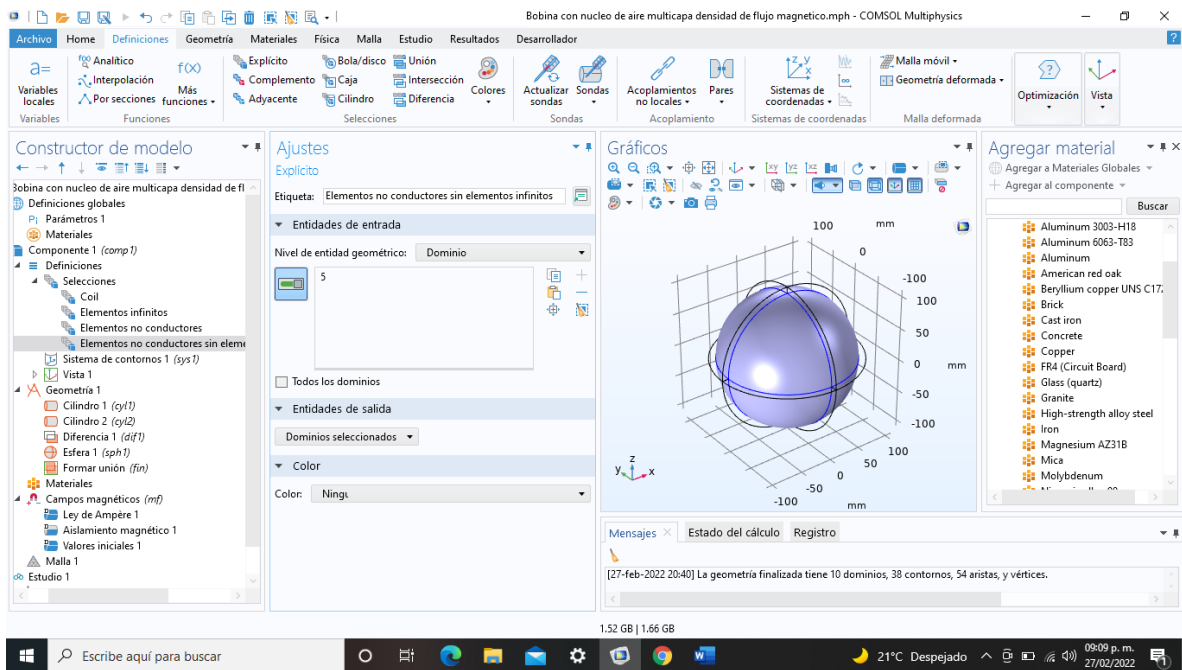


Figura 34 Sección de elementos no conductores para la geometría de una bobina de aire multicapa en COMSOL Multiphysics

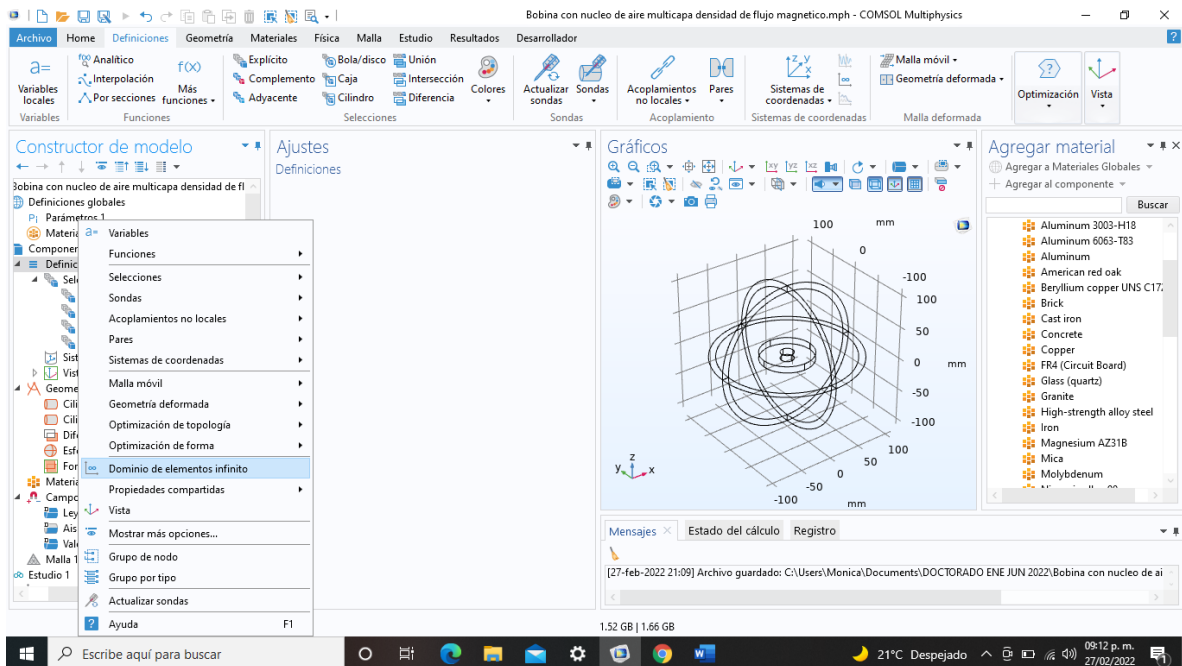


Figura 35 Selección de dominio de elementos infinitos en una bobina de aire multicapa en COMSOL Multiphysics

Ahora hay que asignar los materiales al modelo, para esto se utiliza la barra de materiales /agregar material / AC DC / Copper /agregar a componente 1 (figura 37). En esta primera simulación se trabajó con cobre como material de la bobina, debido

a que los datos experimentales se trabajan con dicho material, posteriormente se realizará un análisis con distintos materiales y anexando el cemento en su interior (fig. 36).

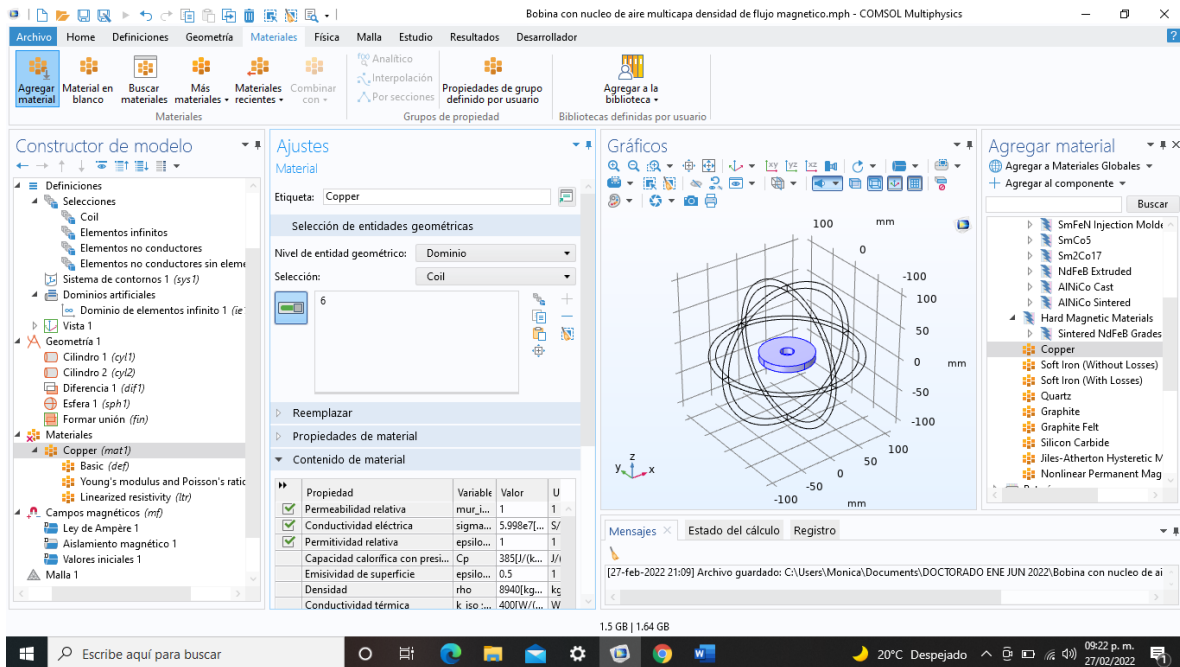


Figura 36 Selección de material cobre para la bobina de aire multicapa en COMSOL Multiphysics

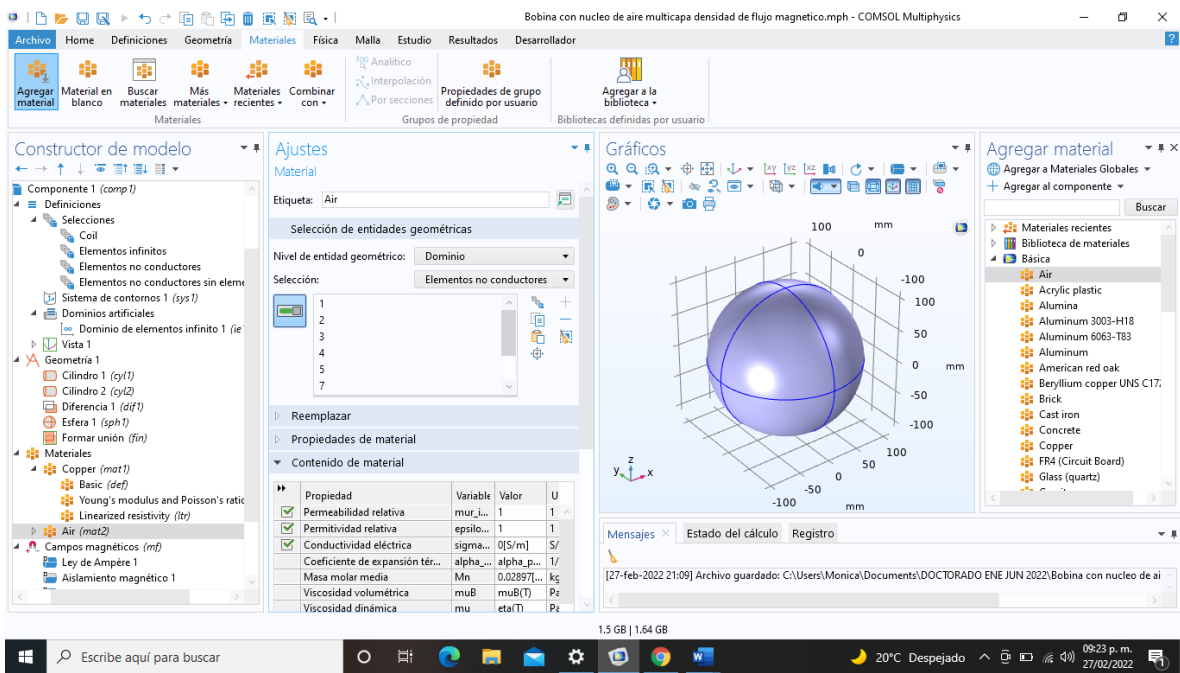


Figura 37 Selección de material aire para la bobina de aire multicapa en COMSOL Multiphysics

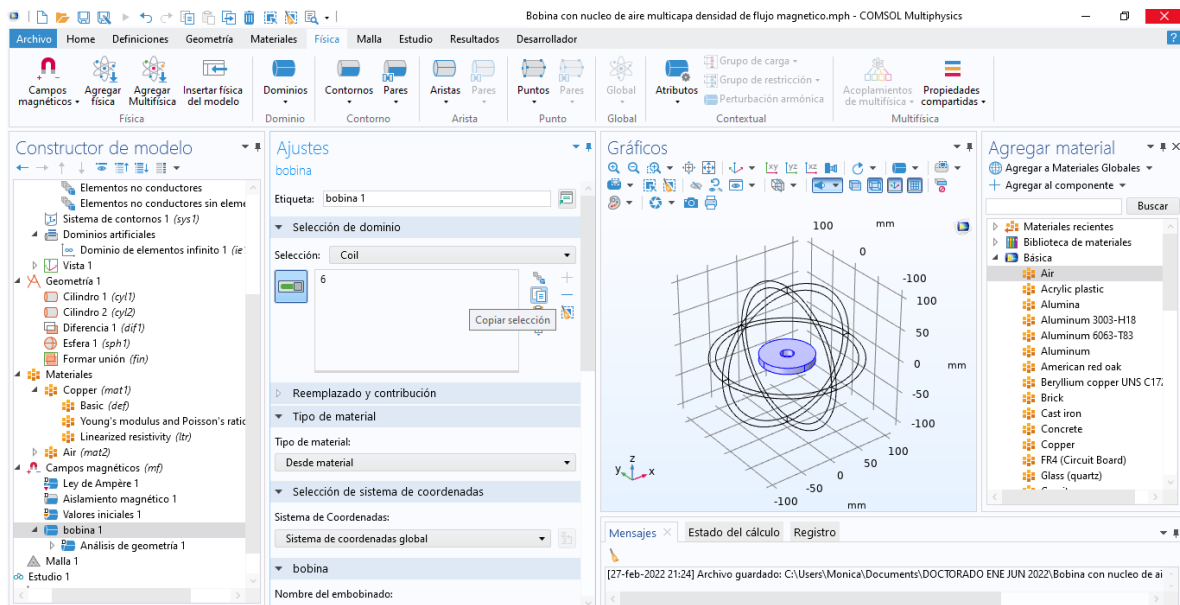


Figura 38 Selección de campos magnéticos para la bobina de aire multicapa en COMSOL Multiphysics

A continuación, se añaden las propiedades o datos de la bobina (figura 38), diámetro del cable 18 AVG (figura 40), las ecuaciones o estudios (figura 41); la mayoría de los datos se añadieron en la parte de parámetros, al inicio de la simulación, para que en este momento solamente se haga mención del parámetro (figura 39).

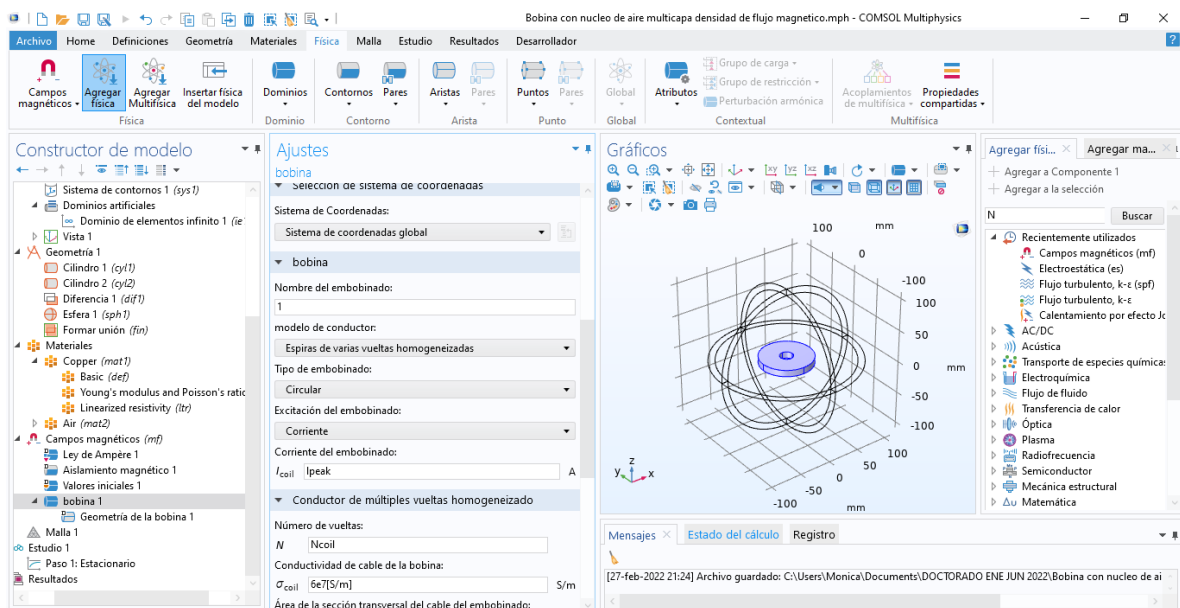


Figura 39 Selección de parámetros para la bobina en los campos magnéticos de una bobina de aire multicapa en COMSOL Multiphysics

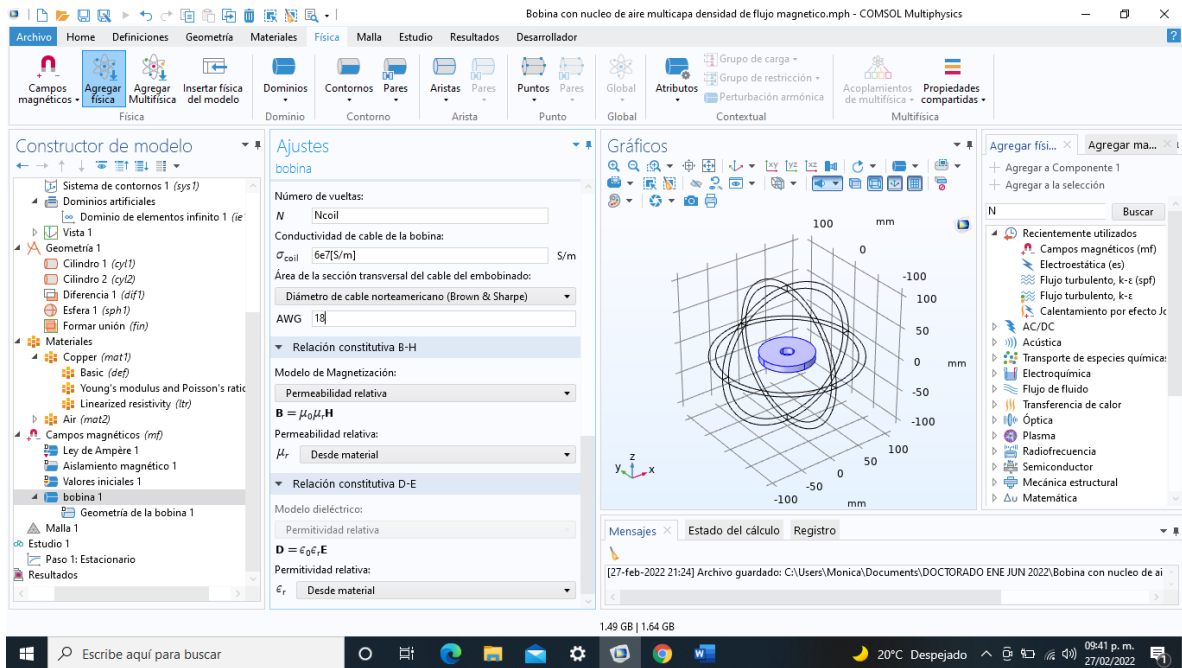


Figura 40 Ajustes sobre campos magnéticos de una bobina de aire multicapa en COMSOL Multiphysics

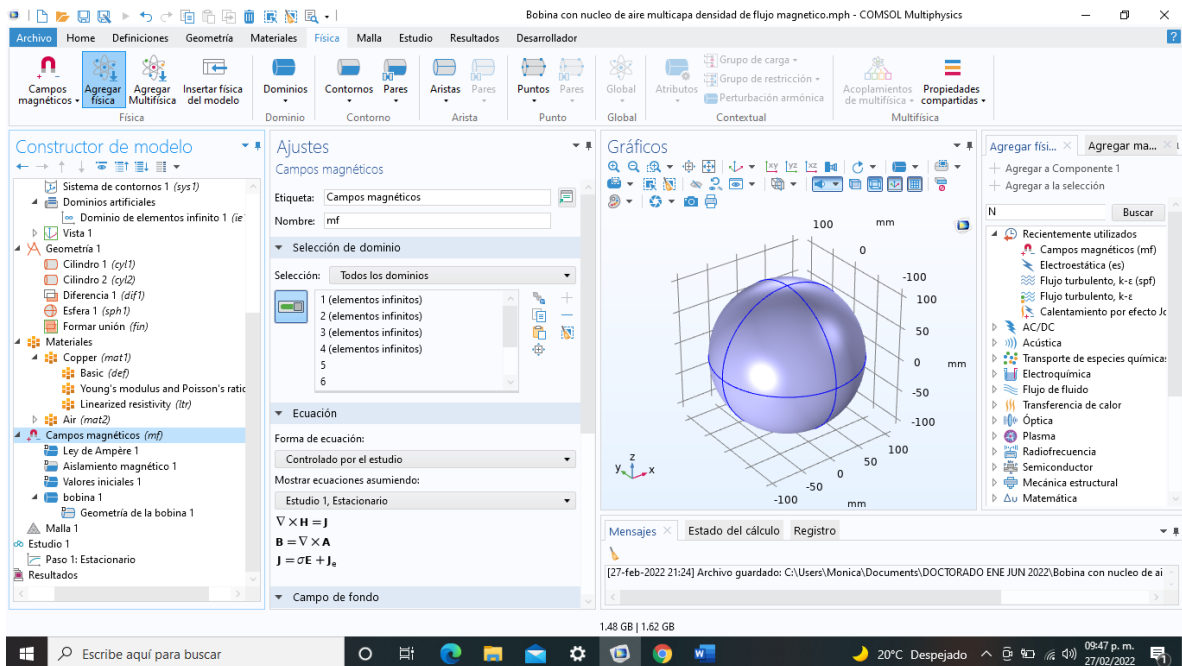


Figura 41 Ecuaciones involucradas en los campos magnéticos de una bobina de aire multicapa en COMSOL Multiphysics

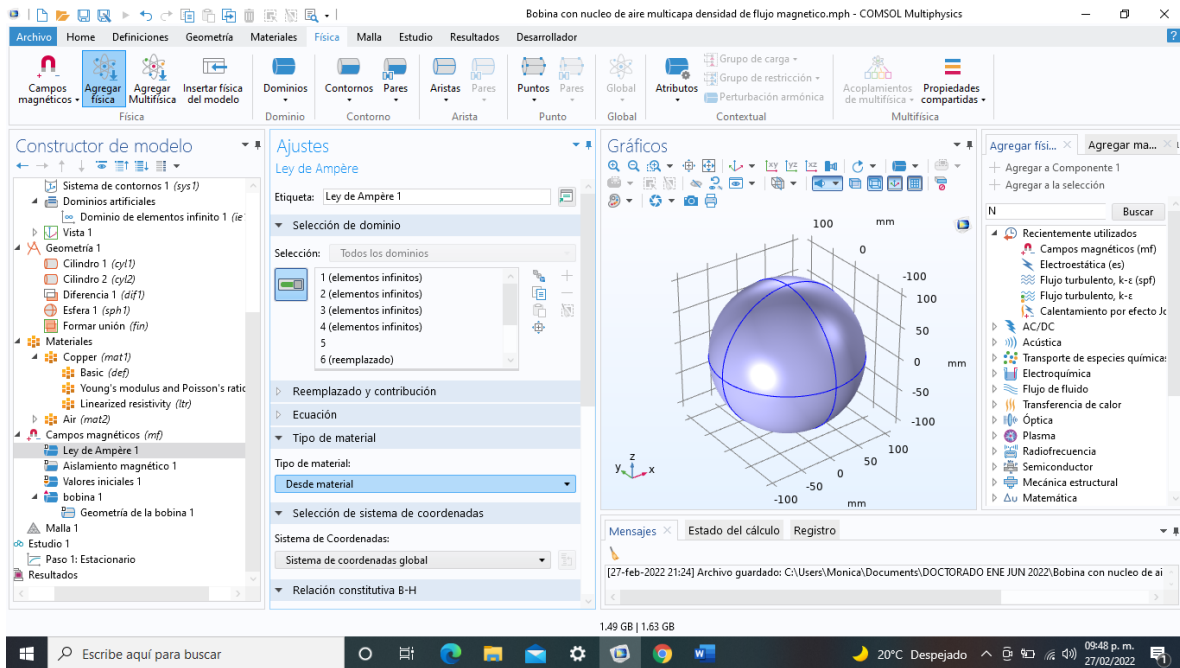


Figura 42 La ley de Ampère en la simulación de una bobina de aire multicapa en COMSOL Multiphysics

Se asignan los bordes de la geometría de la bobina 1, para definir el camino, la dirección y la longitud, se añade la ley de ampère para esta simulación (figura 42). Se seleccionan en el gráfico todos los bordes circulares. En la parte de geometría se puede definir que la geometría se elaboró en COMSOL y que no se importó de otro programa, si no se realiza probablemente se puedan tener errores cuando se corra el programa (figura 43).

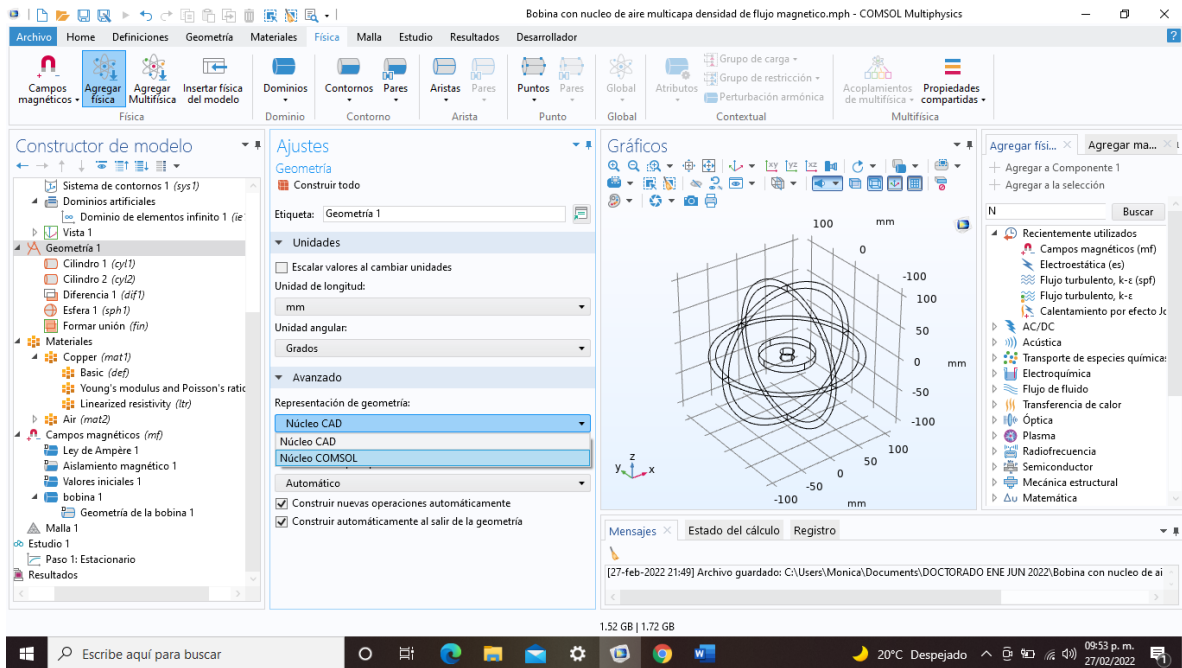


Figura 43 Representación de geometría “Núcleo COMSOL” para una bobina de aire multicapa en COMSOL Multiphysics

Se realizó una mejora en la resolución del mallado a “más fina”, para obtener una simulación más robusta (figura 44).

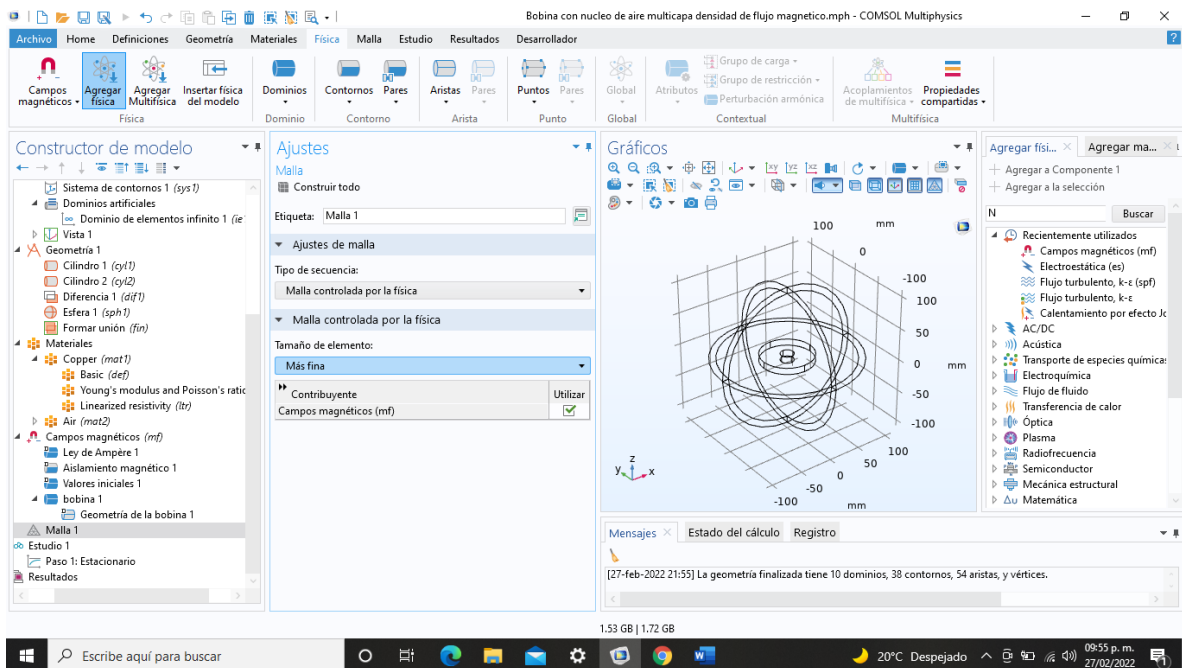


Figura 44 Ajustes de malla para una bobina de aire multicapa en COMSOL Multiphysics

Después de asignar los valores anteriores, se realiza el estudio del sistema, obteniendo valores de campos magnéticos los cuales serán después editados para muestras de cemento y valores de temperatura inicial comparadas con la radiación láser, en la parte de resultados se puede observar el análisis y resultados sobre esta simulación.

En la figura 45 se muestra la densidad de flujo magnético en la unidad T (Tesla), lo que nos sugiere que el estudio fue bien realizado, estos valores nos sirven como guía para nuevas simulaciones adecuadas en nuestros casos experimentales.

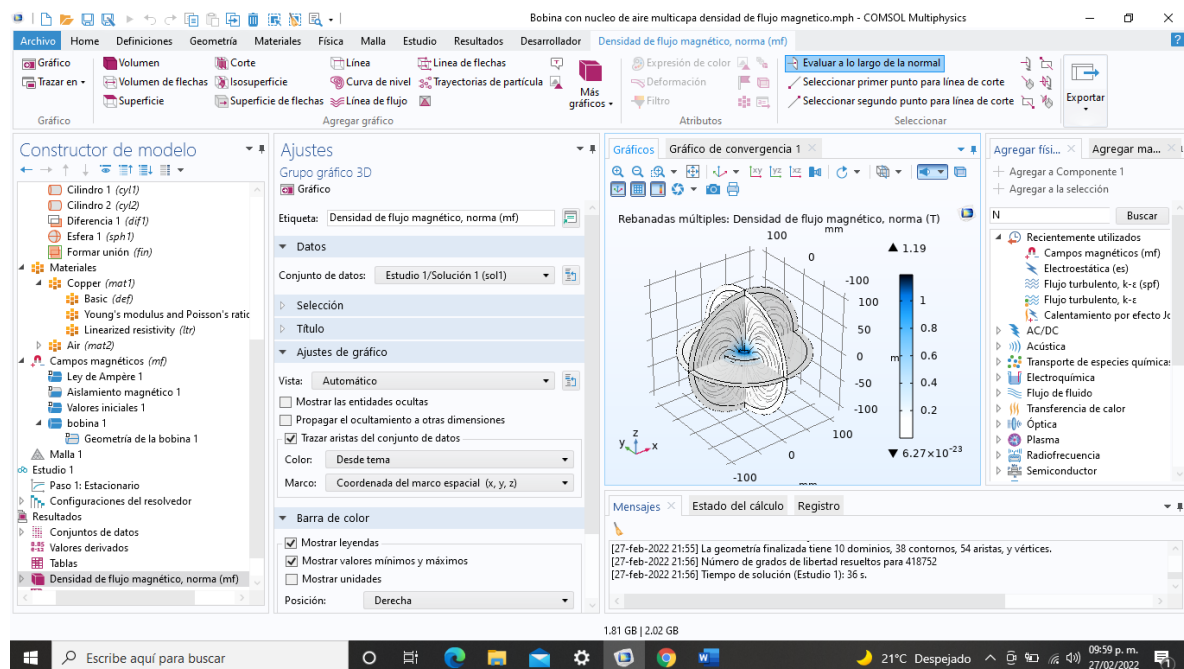


Figura 45 Resultados sobre los campos magnéticos de una bobina de aire multicapa en COMSOL Multiphysics

Con tubo intermedio

Utilizamos la información obtenida de la gráfica anterior para diseñar un sistema mejorado. En este diseño, se incorporó un tubo intermedio de cobre, que actúa como un elemento adicional en el proceso. Posteriormente, se añadió el cemento en el interior del tubo de cobre, lo que permitió estudiar cómo este componente influye en las propiedades del sistema y optimizar su rendimiento. Esta configuración busca aprovechar las propiedades térmicas y conductoras del tubo de

cobre, en conjunto con las características del cemento, para mejorar el análisis del calentamiento por inducción (figuras 46, 47 y 48).

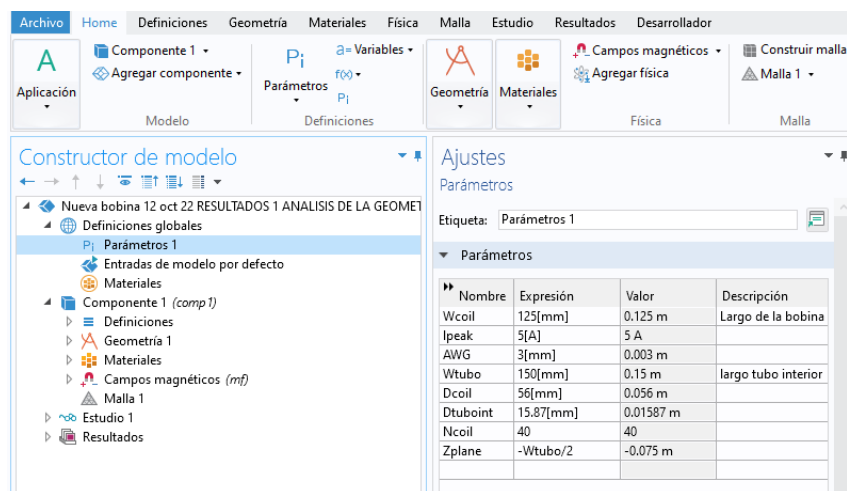


Figura 46 Parámetros experimentales a considerar en el desarrollo de la simulación de la bobina de aire multicapa con tubo intermedio

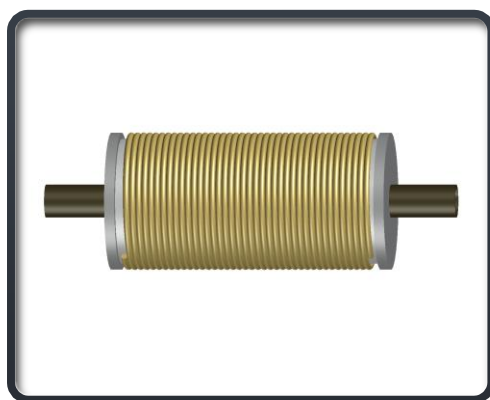


Figura 47 Geometría experimental de la bobina en autocad

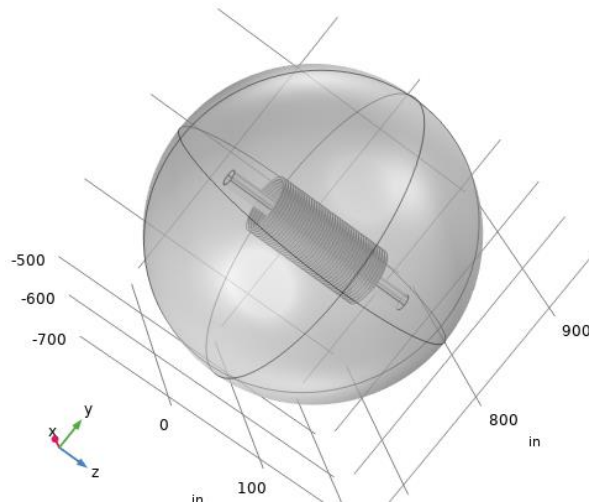


Figura 48 Simulación con diseño geométrico importado de la bobina

En esta nueva simulación se logró obtener un modelo aproximado a los datos experimentales y en el cual podríamos estudiar el efecto de la frecuencia en los campos magnéticos generados, así como en el calentamiento de la barra interior de la bobina.

Se anexó un estudio de frecuencia o dominio de la frecuencia para poder estudiar la respuesta del modelo a diferentes tipos de frecuencias, en este caso se trabajó con 30, 35, 40, 45 kHz.

Al final se logró obtener una simulación con resultados muy aproximados a los que se tienen en la experimentación, logrando obtener datos sobre el flujo magnético y la temperatura de calentamiento por inducción de una barra de cobre con interior de concreto.

En las figuras 49 y 50 se muestran las propiedades del concreto que se añadieron y la obtención de la malla.

▼ Contenido de material					
»	Propiedad	Variable	Valor	Unidad	Grupo de propiedad
✓	Conductividad térmica	k_iso ;...	k_solid_...	W/(m·...	Básico
✓	Densidad	rho	2400	kg/m ³	Básico
✓	Capacidad calorífica con presi...	Cp	1.050	J/(kg·K)	Básico
✓	Conductividad eléctrica	sigma...	0.001	S/m	Básico
✓	Permeabilidad relativa	mur_is...	0.5	1	Básico
✓	Permitividad relativa	epsilo...	0.5	1	Básico

Figura 49 Propiedades del concreto añadido a la simulación

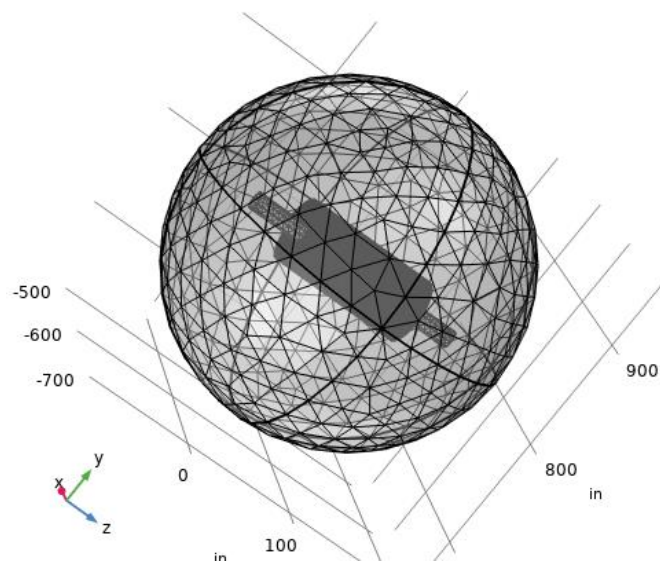


Figura 50 Obtención de la malla para el desarrollo del modelo de bobina de aire multicapa con tubo intermedio, malla tipo normal

3.3 Transferencia de calor en la bobina

3.3.1 Simulación de calentamiento por inducción

En este apartado se llevó a cabo una simulación con el objetivo de analizar el calentamiento por inducción de una barra de cobre. La barra se ubicó en el interior de una bobina, donde el campo magnético generado induce corrientes en la barra, provocando su calentamiento debido a las pérdidas por efecto Joule, el cuál es el fenómeno por el cual un conductor eléctrico se calienta cuando una corriente eléctrica lo atraviesa. Este calentamiento ocurre porque los electrones en movimiento (la corriente) chocan con los átomos del material del conductor, lo que transfiere energía y genera calor.

La simulación se desarrolló en un entorno bidimensional utilizando el software COMSOL Multiphysics, el cual permite resolver problemas acoplados de electromagnetismo y transferencia de calor. Este enfoque facilitó la representación precisa del sistema y la evaluación de los parámetros clave que influyen en el fenómeno de calentamiento.

Los resultados obtenidos permitieron observar la distribución de temperaturas en la barra de cobre, así como el comportamiento del campo magnético y las corrientes inducidas en el material. Esta metodología proporcionó información valiosa para comprender los mecanismos físicos subyacentes al proceso de calentamiento por inducción, además de ofrecer una herramienta útil para el diseño y optimización de sistemas similares.

A continuación, se muestran algunos de los pasos de dicha simulación. Se eligió un modelo en 2D, de calentamiento electromagnético por inducción, y se estudió la frecuencia, ver figuras 51 y 52.

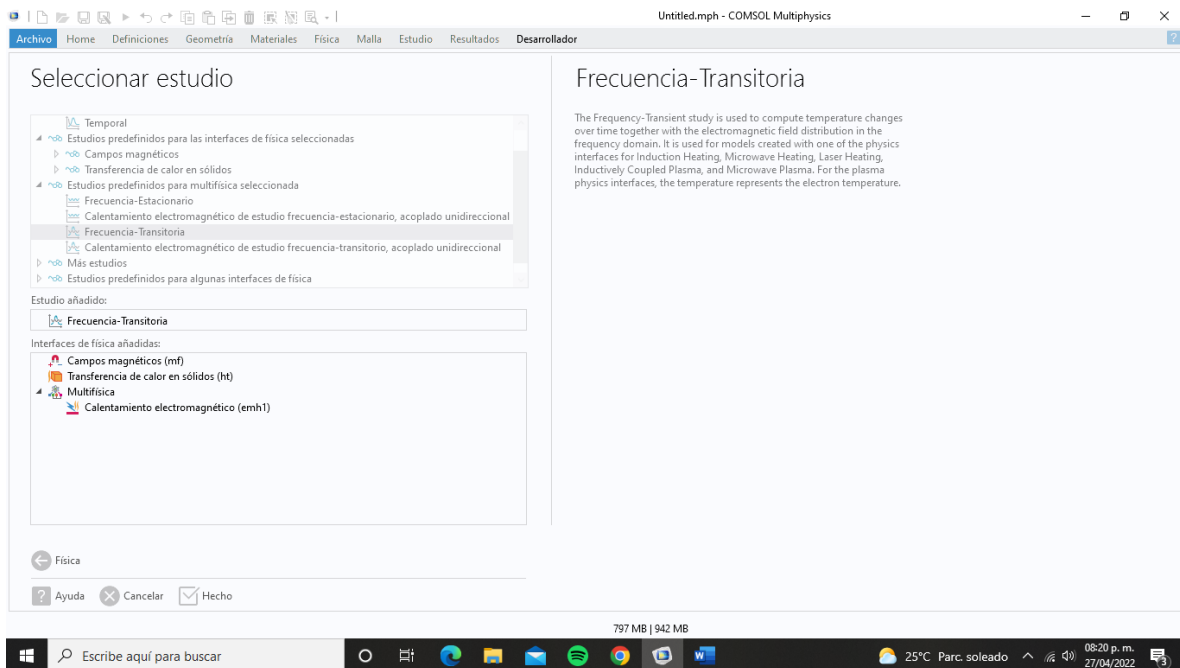


Figura 51 Selección de estudio tipo frecuencia transitoria para la simulación de calentamiento por inducción

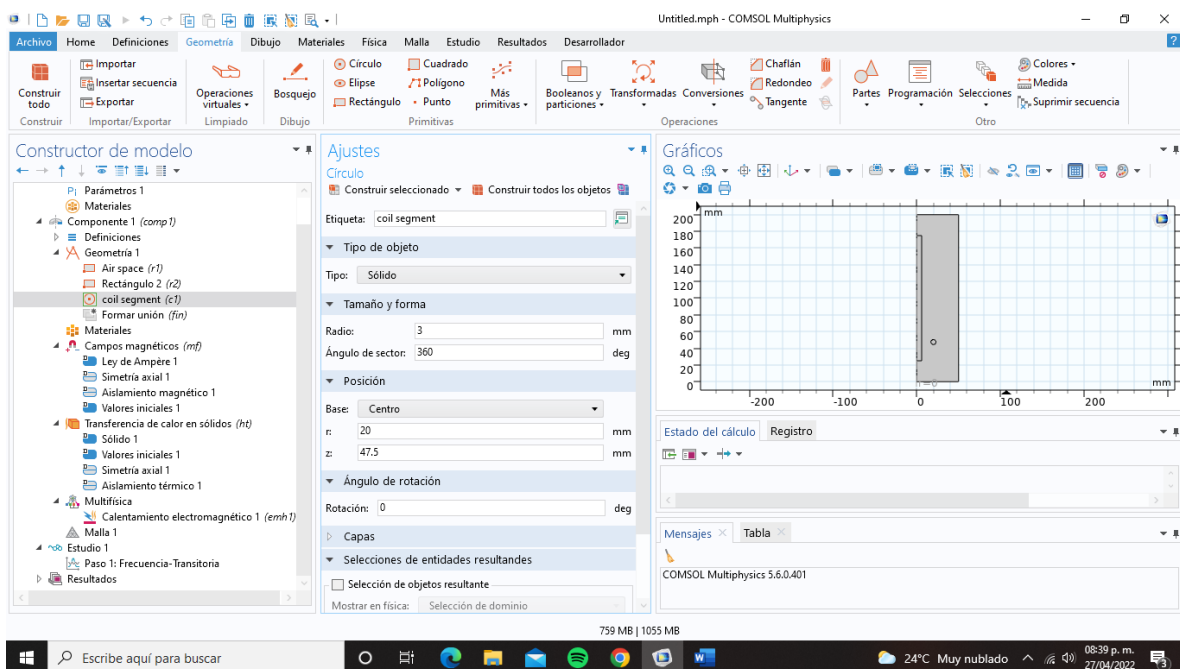


Figura 52 Edición de la geometría de la bobina para la simulación de calentamiento por inducción

Se agregan los materiales, comenzando con el aire y después se agregó el cobre a la geometría específica de la bobina (figuras 53 y 54). Se anexa el apartado de

bobina para el estudio de campos magnéticos (figura 55), y se elige un diseño de malla fina para mayor precisión de los datos tal como se muestra en la figura 56.

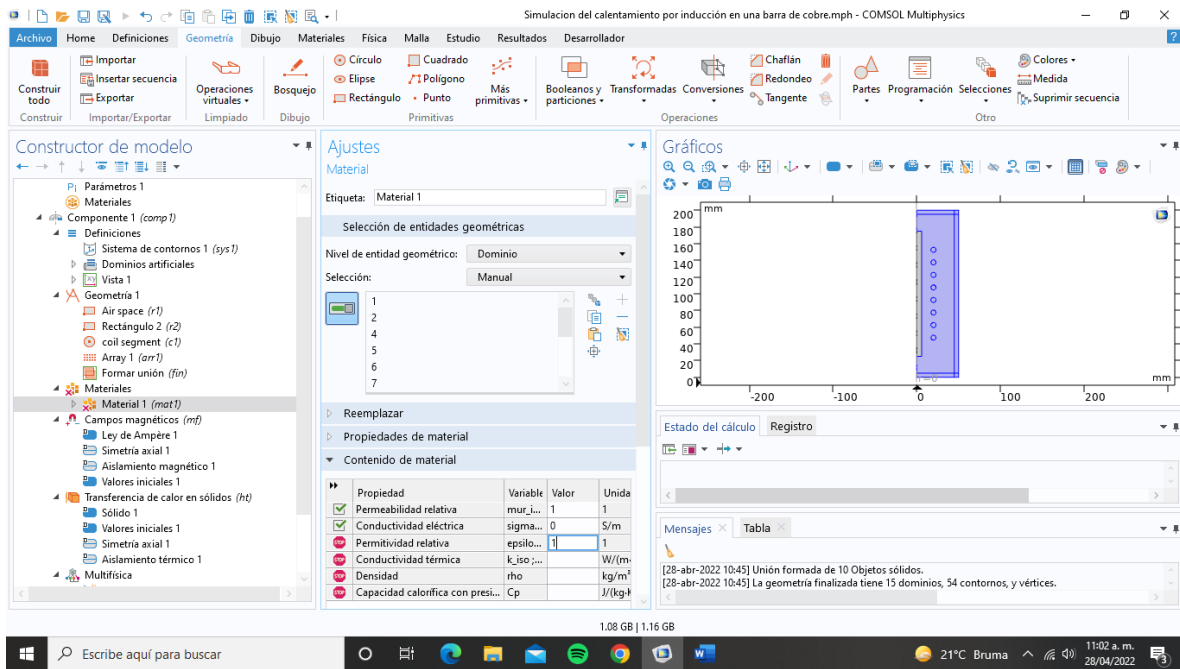


Figura 53 Selección de material aire para la simulación de calentamiento por inducción

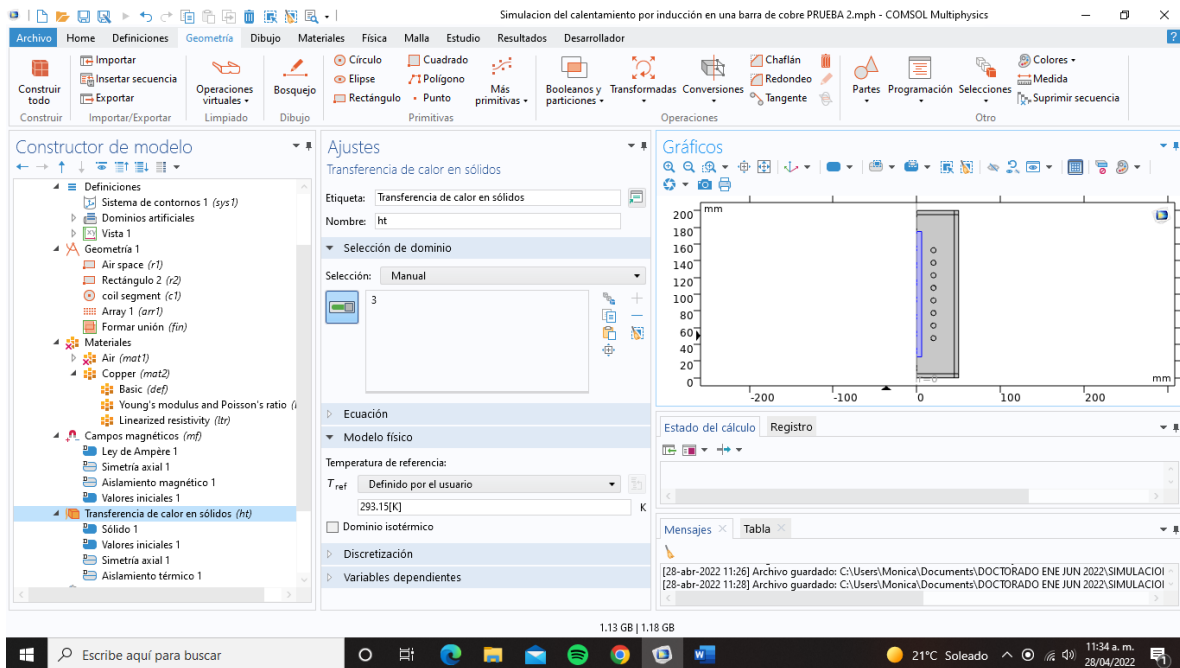


Figura 54 Selección de material cobre para la simulación de calentamiento por inducción

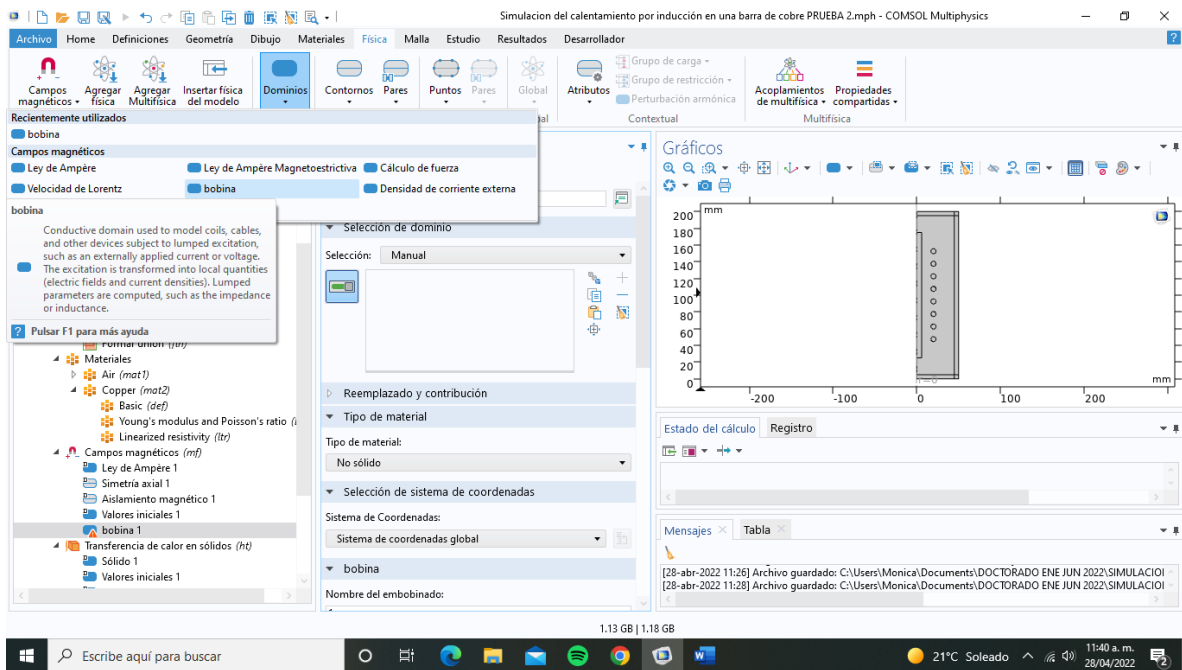


Figura 55 Anexo de estudio para la bobina para la simulación de calentamiento por inducción

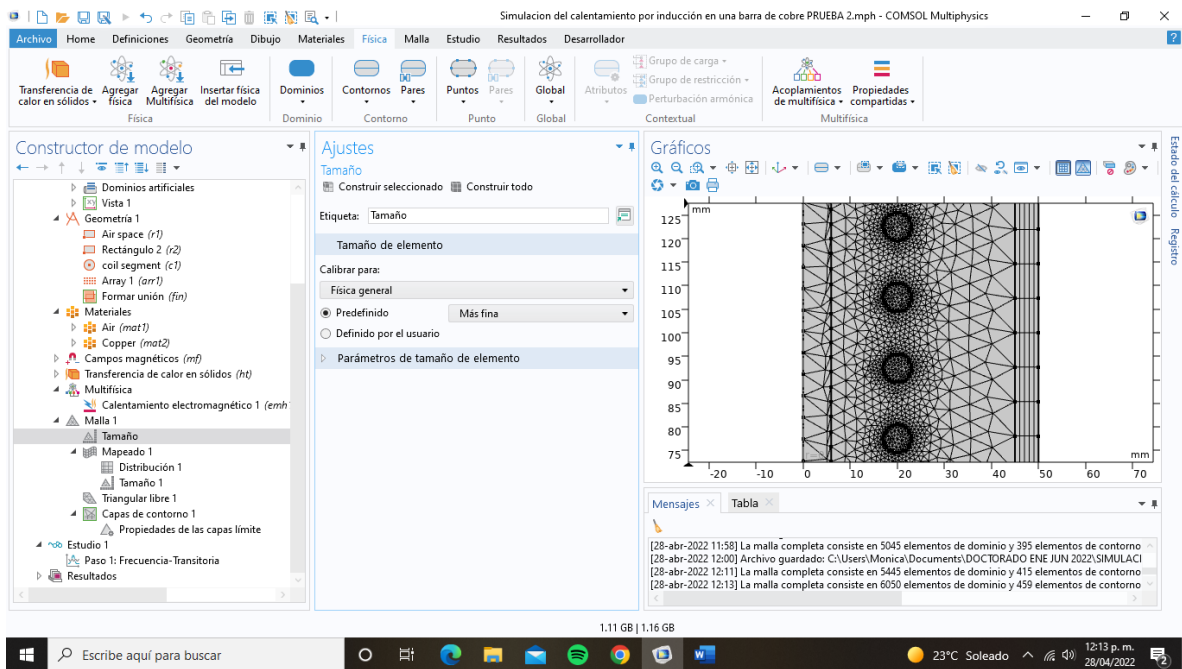


Figura 56 Mallado para la simulación de calentamiento por inducción

Adición del cemento Portland a la base de Datos de COMSOL Multiphysics

Para añadir el cemento Portland a los materiales en COMSOL Multiphysics, se siguen los siguientes pasos:

1. Abrir el modelo en COMSOL Multiphysics y se selecciona la opción "Materials" en el menú principal.
2. En la ventana "Materials", clic en "Add Material" para crear un nuevo material.
3. Seleccionar el tipo de material que se desea crear. Para el cemento Portland, se puede elegir "Solid" o "Mixture" dependiendo de si estás modelando una mezcla de cemento con otros materiales.
4. Se asigna un nombre al material, por ejemplo "Cemento Portland".
5. En la pestaña "Composition", se define la composición del material. Para el cemento Portland, se agregan los componentes principales como el clinker de cemento, yeso, y otros aditivos.
6. En la pestaña "Properties", se definen las propiedades físicas y mecánicas del material, tales como la densidad, conductividad térmica, coeficiente de dilatación térmica, módulo de elasticidad, entre otros.
7. Guardar los cambios y cierra la ventana de materiales.

Una vez que se haya creado el material de cemento Portland en COMSOL Multiphysics, se puede utilizar el modelo en las partes correspondientes, como definir las propiedades del sólido en la geometría, establecer las condiciones de contorno o definir las leyes de comportamiento.

3.4 Simulaciones del fraguado del cemento con HETT²²

3.4.1 Estudio del fraguado del cemento

En este estudio, se ha llevado a cabo un análisis del proceso de fraguado del cemento utilizando una simulación computacional, con el objetivo de evaluar cómo diferentes factores ambientales influyen en este proceso. El fraguado del cemento es crucial para garantizar la calidad y la resistencia de las estructuras construidas, por lo que entender las variables que afectan su comportamiento es esencial para optimizar los tiempos de trabajo y los resultados finales. Dicho estudio fue realizado en conjunto con la aplicación HETT²² y simulaciones en COMSOL Multiphysics.

Descripción de la herramienta HET²²

La HET²² es un equipo de laboratorio diseñado específicamente para realizar ensayos de tiempo de fraguado del cemento. Se utiliza comúnmente en la industria de la construcción, en laboratorios de control de calidad de cementos y concretos, y en investigaciones relacionadas con materiales de construcción.

Función principal:

Medir de manera precisa el tiempo de inicio y fin del fraguado del cemento, es decir, determinar el momento en que la pasta de cemento comienza a perder su plasticidad y empieza a endurecer, hasta alcanzar un estado sólido.

¿Cómo funciona?

La HET²² basa su funcionamiento en el método de la aguja de Vicat, de acuerdo con las normas ASTM C191 o NMX-C-021-ONNCCE (o la normativa aplicable en cada país) [43].

El método de madurez

El método de madurez es una técnica empleada en la industria de la construcción para predecir el desarrollo de la resistencia del hormigón a lo largo del tiempo. El hormigón gana resistencia a medida que cura y este proceso depende en gran medida de la temperatura. El método se basa en el principio de que la tasa de

ganancia de resistencia del hormigón está directamente influenciada por el historial de temperaturas que sufre durante el endurecimiento. El modelado matemático de este método se basa en los descubrimientos del químico Svante Arrhenius, premio Nobel sueco en 1903, quien introdujo la ecuación de Arrhenius, incorporando el concepto de energía de activación. Dicha ecuación se describe a continuación:

$$k = A * e^{\frac{-E_a}{RT}} \quad (29)$$

Donde:

k = Constante de velocidad de la reacción

A = Factor pre-exponencial o frecuencia de colisiones

E_a = Energía de activación (J/mol)

R = Constante universal de los gases (8.314 J/mol·K)

T = Temperatura absoluta (Kelvin)

e = Base de los logaritmos naturales (~2.718)

Esta ecuación es fundamental en la cinética química y se utiliza para describir cómo la velocidad de una reacción depende de la temperatura. Utilizando la ecuación de Arrhenius, durante el proceso de endurecimiento del hormigón se puede determinar el llamado tiempo equivalente y, por tanto, la madurez del hormigón. El tiempo equivalente es un valor calculado que representa la cantidad total de tiempo a una temperatura de referencia estándar que es equivalente al historial de tiempo-temperatura real experimentado por el concreto.

El método de madurez se implementa en un modelo COMSOL® utilizando la interfaz física de Transferencia de Calor en Sólidos para simular la transferencia de calor. El tiempo equivalente se calcula con la interfaz física de ODE (ecuaciones diferenciales ordinarias) y DAE (ecuaciones diferenciales algebraicas) de dominio y la resistencia del hormigón calculada se basa en el tiempo equivalente.

La interfaz gráfica de usuario

La aplicación viene equipada con una variedad de escenarios de construcción predefinidos, que cubren diversas construcciones, incluidas paredes, pisos, losas, columnas, y la capacidad de importar mediciones desde sensores (figura 57).

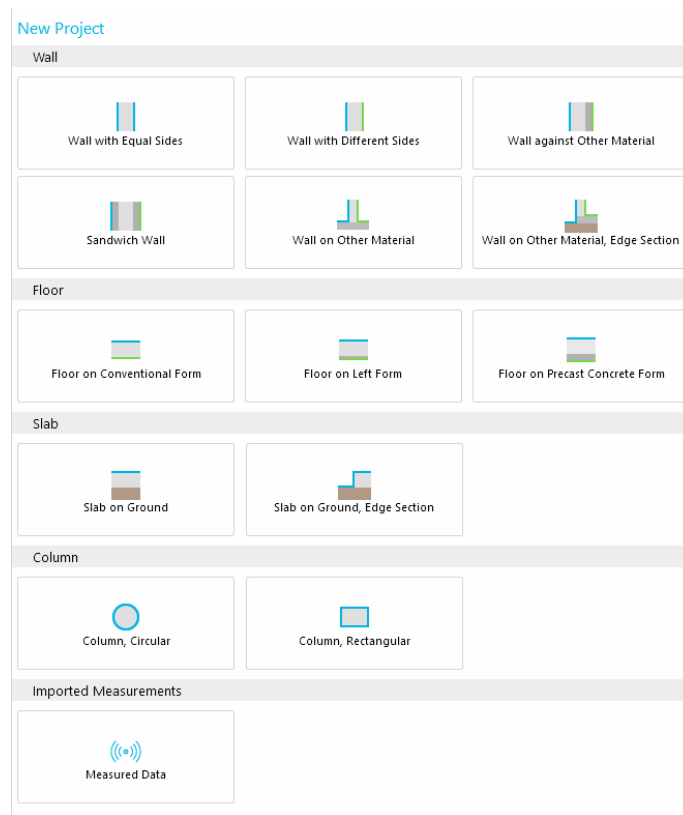


Figura 57 Opciones de casos de estudio con HET²²

Excepto en el caso de datos medidos, que utiliza 1D, todas las simulaciones se realizan en 2D. Una vez que se ha seleccionado un caso, la interfaz de usuario y las opciones se adaptan al escenario específico.

Los componentes principales de la interfaz gráfica de usuario incluyen un menú de navegación a la izquierda, una ventana de configuración correspondiente a la opción seleccionada en el menú de navegación, gráficos a la derecha y un menú de cinta en la parte superior.

Menú de navegación

Para todos los casos 2D, el menú de navegación contiene las siguientes opciones:

- **Construcción.** Dimensiones y materiales.
- **Hormigón.** Calidad del hormigón, tipo y cantidad de cemento y ligante adicional.
- **Tiempo.** Tiempo de simulación, tiempo de inicio de lanzamiento y configuración de tiempo avanzada para el solucionador.
- **Condición climática.** Condiciones de temperatura y viento que pueden ser constantes, variables o basadas en datos de pronóstico del tiempo. Diferentes lados pueden tener diferentes condiciones.
- **Protección contra el clima.** Mayor temperatura con configuraciones de viento opcionales.
- **Tubería.** Dimensión, posición, material, temperatura y condiciones de encendido/apagado.
- **Cable calefactor.** Posición, potencia y condiciones de encendido/apagado.
- **Temperatura.** Importe datos de sensores de hormigón o temperatura ambiente para compararlos con simulaciones.
- **Resultados.** Datos de salida como fuerza y temperatura. Posibles advertencias y notificaciones.

Todas las paredes y columnas tienen la opción de quitar el encofrado (material externo) poco después del vaciado. Puede especificar un tiempo específico o una resistencia del concreto para la eliminación del encofrado. En la última opción, el tiempo de eliminación del formulario se calcula automáticamente. Además, se puede agregar aislamiento después de quitar el encofrado.

Cuando se trata de suelos y losas, existe un interés particular en proteger el hormigón del frío y la congelación, lo que se puede conseguir añadiendo una cubierta o utilizando calefacción por infrarrojos. Además, se pueden ingresar opciones de allanado de superficies.

Capítulo 4. Resultados

4.1 Simulación de la química del cemento en Aspen Plus

4.1.1 Análisis cualitativo del producto

Los resultados de la simulación se presentan en una gran lista de datos, en la sección Results Summary>Streams, sin embargo, para facilitar su lectura, se decidió exportar la lista a Excel, mostrada en la tabla 8.

Tabla 8 Resultados cuantitativos de la simulación de la química del cemento en Aspen Plus

Stream	Units	AGUA	CEMENTO	PROD-H	CO2	PROD-E
C3S	Kg	0	168.93	0	0	0
AGUA	Kg	150	0	72.302	0	66.71
TOBER	Kg	0	0	126.044	0	126.044
PORT	Kg	0	0	140.561	0	0
C2S	Kg	0	60	0	0	0
CO ₂	Kg	0	0	0	100	16.807
CACO ₃	Kg	0	0	0	0	189.196
C3A	Kg	0	24	9.167	0	0
YESO-2W	Kg	0	9	0	0	0
C4AF	Kg	0	21	21	0	21
YESO-E	Kg	0	0	7.116	0	1.573
C4A	Kg	0	0	0	0	2.214
VAPOR	Kg	0	0	0	0	34.054
AGUA-E	Kg	0	0	10.044	0	2.22
C3A-E	Kg	0	0	4.707	0	1.04
AGUA-A	Kg	0	0	0	0	1.589
AGUA-Y	Kg	0	0	1.255	0	1.255
YESO-M	Kg	0	0	0	0	5.543
AGUA-M	Kg	0	0	0	0	8.802
YESO	Kg	0	0	0	0	0
C3A-M	Kg	0	0	0	0	11.001
SULFITO	Kg	0	9	0	0	0
AC. SULF	Kg	0	0	0	0	0
YESO-SC	Kg	0	0	0	0	0
YESO-EX	Kg	0	0	15.303	0	
AGUA-EX	Kg	0	0	21.601	0	
C3A-EX	Kg	0	0	10.124	0	
CAL	Kg	0	3.66	3.66	0	0
HDX-CA	Kg	0	0	0	0	
MAGNESIA	Kg	0	4.41	4.41	0	0
HDX-MG	Kg	0	0	0	0	

YESO-S	Kg	0	0	0	0	0
AGUA-S	kg	0	0	2.7	0	2.7
Total (kg)				428.472		

Tabla 9 Masa de minerales complejos

COMPONENTE	MASA (KG)	% MASA SOBRE EL PRODUCTO ENDURECIDO
TOBERMORITA	126.04	29.42
PORTLANDITA	140.56	0.00
CARBONATO DE CALCIO (CACO3)	189.19	44.16
FERRITO ALUMINATO TETRACÁLCICO (C4AF)	21.00	4.90
ETTRINGITA	4.83	1.13
ALUMINATO TETRACÁLCICO (C4A)	3.80	0.89
MONOSULFOALUMINATO	25.34	5.92
ETTRINGITA EXPANSIVA	47.02	10.98
HIDRÓXIDO DE CALCIO	4.83	1.13
HIDRÓXIDO DE MAGNESIO	6.38	1.49

De una mezcla de 300 kg de cemento y 150 kg de agua, se obtuvieron 428.47 kg de producto endurecido, valor referido únicamente a los minerales sólidos que, además, presenta una densidad de **2253 kg/m³**, dentro del rango de la densidad esperada para el concreto. En la tabla 9 se muestra la masa de los minerales complejos del producto, así como su porcentaje de masa en el producto final.

La masa final de producto de 428.472 kg supone que el agua que no hubo reaccionado se evaporó de la mezcla debido a los calores de hidratación, lo que quiere decir que el producto final sufrió una contracción de 66.710 kg, cerca del 14% de su masa original.

El dato de entalpía molar final tiene un valor de **-165.601 kcal/mol**, lo que demuestra el comportamiento exotérmico de las reacciones de hidratación.

Para evaluar el impacto de los compuestos no deseados en el producto endurecido, se realizó una segunda simulación suponiendo que no existen impurezas en el cemento, los resultados se muestran en la tabla 10.

Tabla 10 Masa de minerales complejos sin compuestos no deseados

COMPONENTE	MASA (K)	% MASA SOBRE EL PRODUCTO ENDURECIDO
TOBERMORITA	134.562	32.84
PORTLANDITA	145.210	0.00
CARBONATO DE CALCIO (CaCO ₃)	194.282	47.42
CELITA (C3A)	10.818	2.64
FERRITO ALUMINATO TETRACÁLCICO (C4AF)	27.000	6.59
ETTRINGITA	21.870	0.00
ALUMINATO TETRACÁLCICO (C4A)	10.493	2.56
MONOSULFOALUMINATO	32.541	7.94

La proporción de impurezas propuesta para la primera simulación provoca un decremento de hasta 3% en la cantidad de tobermorita y carbonato de calcio, siendo estos los componentes más preciados al aportar las características al concreto, afectando su calidad y resistencia.

Por otro lado, existe una mayor cantidad de aluminatos cálcicos y sulfoaluminatos, quienes realmente no aportan resistencias relevantes al endurecimiento, sin embargo, es preferible al casi 13% en masa de compuestos tóxicos presentes en el concreto que contiene impurezas.

4.1.2 Análisis de sensibilidad

Variación de la relación agua/cemento

Dentro de las opciones que ofrece Aspen Plus® para el análisis de datos, se llevaron a cabo los análisis de sensibilidad, herramientas que permiten observar la relación de una variable con otra y su impacto. Se encuentra en Model Analysis Tools>Sensitivity.

Se estimó el posible comportamiento de algunos componentes seleccionados al variar la cantidad de agua y de cemento.

Figura 58 Configuración para la variación en la cantidad de cemento

Se planeó variar, primeramente, la cantidad de cemento alimentada. Siendo 300 kg la alimentación original, se alteró desde 200 a 400 kg, obteniendo resultados por incrementos de 10 kg, ver figura 58.

La relación agua/cemento varía de 0.375 hasta 0.75, conservando la misma cantidad de agua, 150 kg.

Figura 59 Configuración para observar el impacto de la variación sobre la tobermorita y el carbonato de calcio

La fracción másica de los componentes de los que se desea conocer el impacto debido a la alteración en la cantidad de cemento son tobermorita (TOBER) y carbonato de calcio (CaCO_3), ya que se consideran los más relevantes para el producto endurecido (figura 59).

Por último, se definieron las variables a tabular, y se obtuvieron los resultados mostrados en la figura 60.

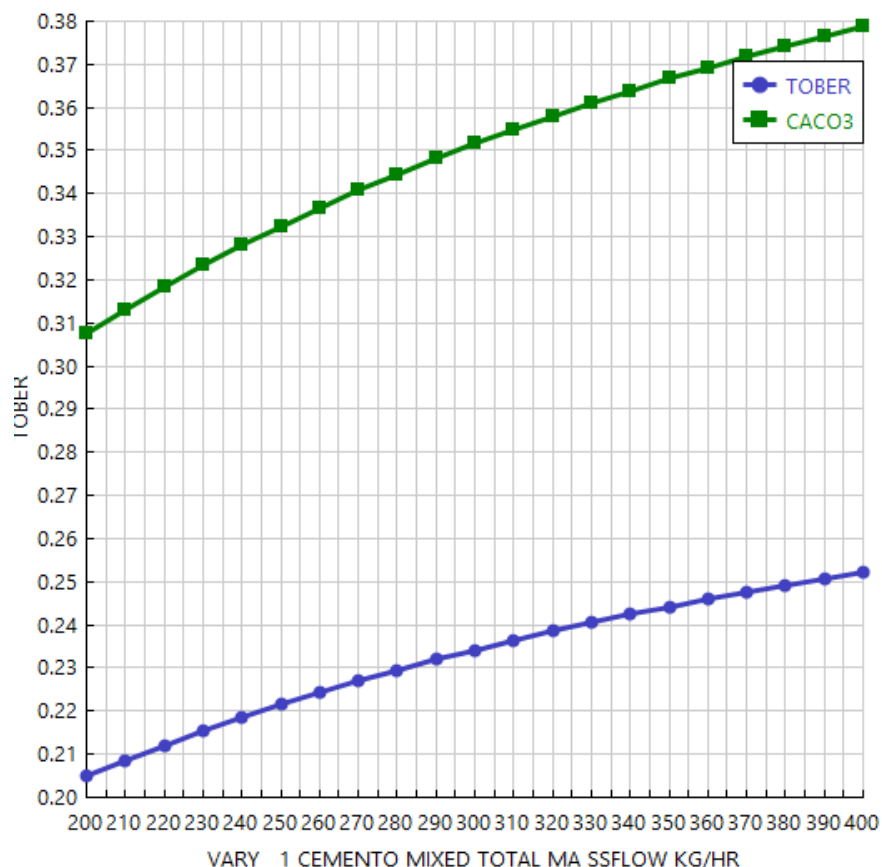


Figura 60 Comportamiento de tobermorita y carbonato de calcio al alterar la cantidad de cemento

La cantidad de cemento determina la cantidad de producto, sin embargo, se puede apreciar que, a mayores aumentos en cantidad de cemento, el rendimiento favorece levemente a la cantidad de carbonato de calcio, siendo cada vez menor el aumento de tobermorita. Ya que la tobermorita proporciona la principal resistencia y propiedades al concreto, se puede esperar que, a mayores cantidades alimentadas de cemento, el porcentaje de tobermorita sea menor, ocasionando una leve pérdida de calidad en el concreto.

Del mismo modo, se realizó un segundo análisis de sensibilidad variando la cantidad de cemento con los valores previos, definiendo ahora el impacto que tiene sobre la densidad, ver figura 61.

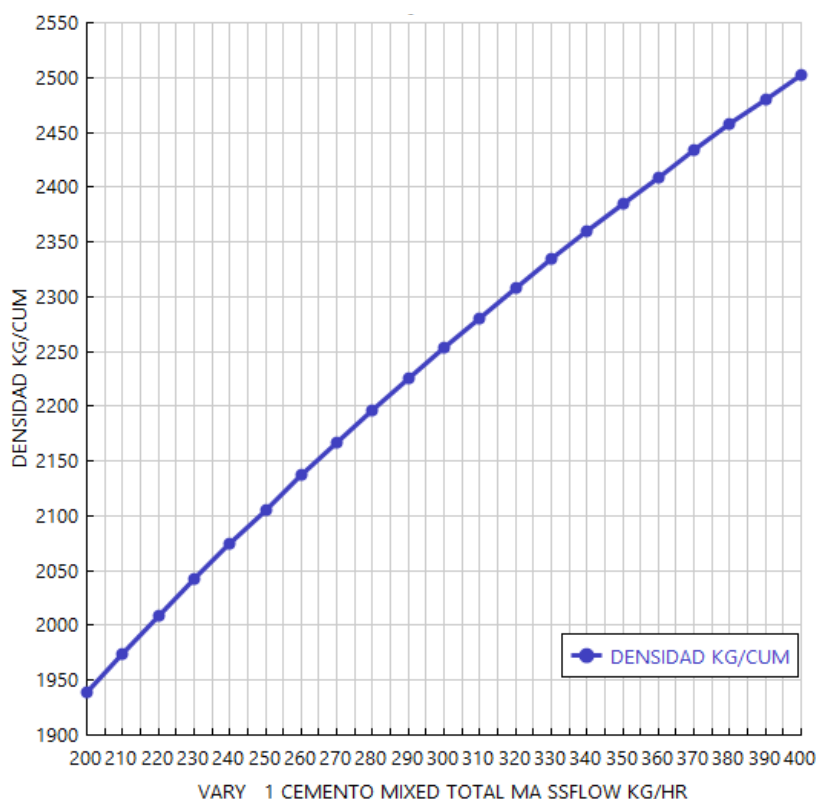


Figura 61 Comportamiento de la densidad al alterar la cantidad de cemento, eje x, densidad cemento kg/m^3 , eje y, cantidad de cemento añadida kg/hr

Se aprecia que la densidad es muy sensible a la cantidad de cemento añadida. Ya que la densidad del concreto establecida es de entre 2240 y 2400 kg/m^3 , cualquier valor inferior o superior sobre ese rango ocasionará un debilitamiento estructural; al ser inferior, el agua usada para el fraguado estará en exceso, “ahogando” los minerales y debilitando la mezcla al suspenderse la actividad química; al ser superior, el cemento estará en exceso, no pudiendo el agua reaccionar con suficientes minerales, perdiendo capacidad de cohesión química.

Con esto se comprueba, de manera digital, lo estudiado por el Ing. Rodrigo Salamanca Correa, donde se menciona que la relación agua/cemento ideal establecida por la experiencia es aquella con valor alrededor de 0.5 [44].

Repitiendo el método, la última variación que se realizó fue la cantidad de agua, siendo el original 150 kg y alterándose desde 100 kg a 200 kg, obteniendo

relaciones agua/cemento desde 0.33 hasta 0.66, manteniendo los 300 kg originales en la cantidad de cemento, y definiendo igualmente la tobermorita y el carbonato de calcio, ver figura 62.

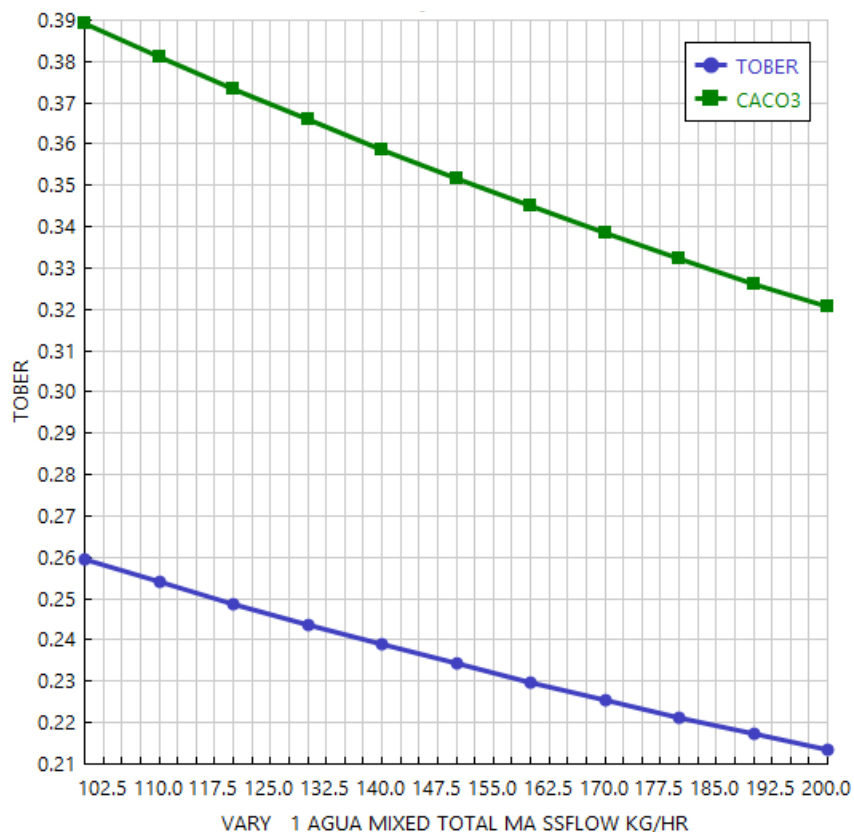


Figura 62 Comportamiento de tobermorita y carbonato de calcio al alterar la cantidad de agua, eje x, composición molar de la tobermorita y carbonato de calcio, eje y, cantidad de agua añadida kg/hr

Mayores cantidades de agua provoca que las partículas de cemento no disminuyan, produciendo cada vez menores compuestos endurecidos. Sin embargo, menores cantidades de agua provocarían que la cohesión química entre los compuestos endurecidos no fueran lo suficientemente fuertes.

Se realizaron varias corridas con diferentes temperaturas ambientales, los resultados se muestran en la tabla 11.

Tabla 11 Resultados de entalpía y densidad para varias temperaturas en el producto final de la simulación

TEMPERATURA REACTOR °C	ENTALPIA kcal/mol	DENSIDAD CEMENTO Kg/m ³
20	-164.59	2136.58
25	-164.51	2134.48
30	-164.44	2132.37
35	-164.36	2130.24
40	-164.28	2128.09
45	-164.21	2125.93
50	-164.13	2123.74
100	-163.28	2100.81

La tabla muestra los resultados de las entalpías (en kcal/mol) y las densidades del cemento (en kg/m³) obtenidos a diferentes temperaturas en el producto final de la simulación del fraguado del cemento en Aspen. A continuación, un análisis de los datos presentados:

1. Entalpía:

Hay una disminución gradual de la entalpía a medida que la temperatura del reactor aumenta. Este comportamiento sugiere una relación inversa entre la temperatura y la entalpía del sistema, lo cual es típico en procesos endotérmicos o exergónicos donde los cambios energéticos son afectados por la temperatura.

2. Densidad del cemento:

La densidad también disminuye con el incremento de la temperatura. Esto se debe a la pérdida de agua interna (secado), formación de poros y microfisuras y estructura interna menos densa por reacciones aceleradas. Esto afecta no solo la densidad, sino también la resistencia mecánica y durabilidad del material.

Estos resultados nos muestran una relación con la temperatura del ambiente y la energía liberada en cada uno de los casos, siendo un dato interesante de acuerdo con lo estudiado de manera experimental, lo que nos ayuda a validar el método de solución empleado. Dicha tendencia se puede observar en la figura 63.

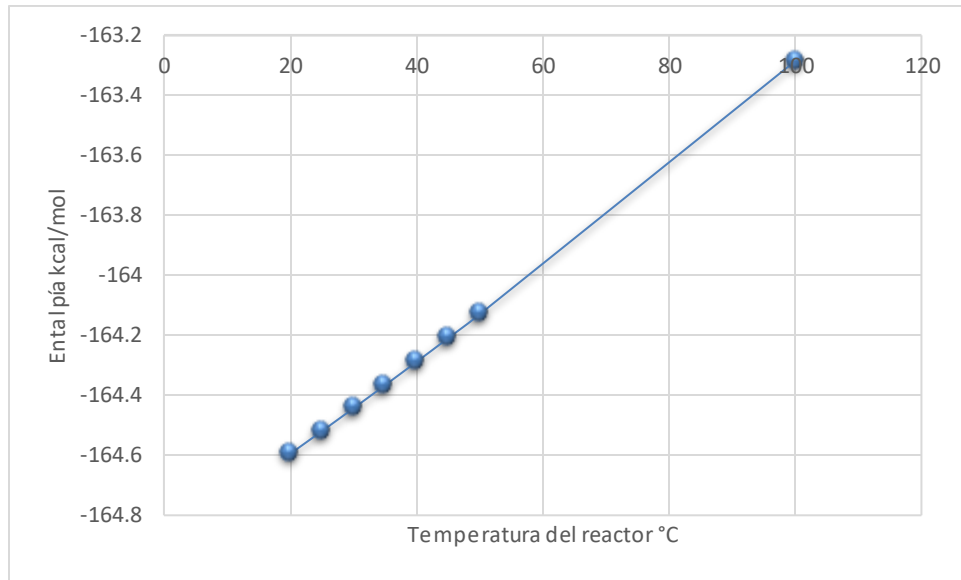


Figura 63 Entalpía de reacción a diferentes temperaturas en la simulación con Aspen Plus

La figura 64 muestra la variación de la densidad del cemento después del fraguado en función de la temperatura ambiental, obtenida mediante simulación en Aspen Plus. Se observa una tendencia decreciente de la densidad conforme aumenta la temperatura, debido principalmente a la mayor evaporación de agua interna, formación de poros y cambios en la microestructura del material. Este comportamiento refleja el efecto térmico en el proceso de hidratación y en la compactación del sistema cementante.

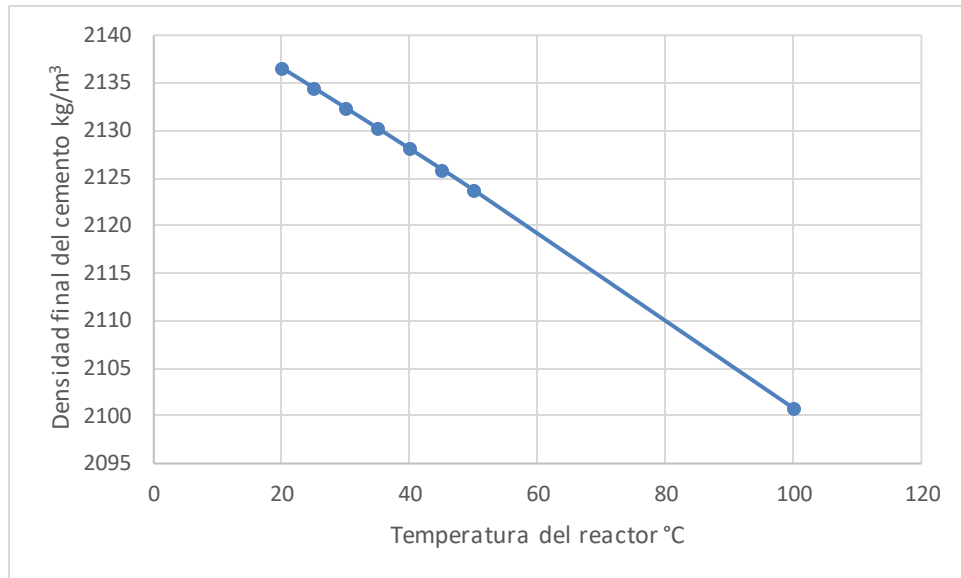


Figura 64 Densidad del cemento a diferentes temperaturas en la simulación con Aspen Plus

Análisis del comportamiento de los resultados de la densidad del cemento

1. Tendencia general:

La gráfica muestra una **disminución lineal inicial** de la densidad del cemento (en kg/m³) con el incremento de la temperatura (en °C).

A partir de los **45 °C**, la densidad muestra un descenso más marcado, lo que sugiere un cambio significativo en el comportamiento del material (fig. 68).

2. Rango de valores:

Temperatura: El rango va de 20 °C a 50 °C.

Densidad: Comienza alrededor de **2140 kg/m³** y desciende hasta cerca de **2090 kg/m³**.

3. Cambio abrupto:

Entre **45 °C y 50 °C**, la densidad del cemento experimenta una caída más pronunciada comparada con el comportamiento entre los 20 °C y 45 °C.

Este cambio podría ser consecuencia de factores como: expansión térmica del material, pérdida de humedad interna o deshidratación de compuestos, cambios en la microestructura del cemento.

Implicaciones físicas

1. Disminución de la densidad:

Cuando la temperatura aumenta, el volumen del material puede expandirse o los poros internos del cemento pueden aumentar, reduciendo su densidad global.

Si el material pierde agua o componentes volátiles, esto también contribuye a la reducción de la densidad.

2. Rango crítico:

El rango de temperatura de **45 °C a 50 °C** puede indicar un umbral térmico en el que ocurren cambios significativos en el material. Esto podría ser relevante si el cemento será expuesto a altas temperaturas en su aplicación.

Posibles áreas de interés

1. Impacto en la resistencia mecánica:

Un cambio en la densidad puede afectar propiedades como la resistencia a la compresión o durabilidad.

Si la densidad continúa reduciéndose con el aumento de la temperatura, podría haber un debilitamiento estructural del material.

2. Condiciones de exposición:

Este comportamiento podría ser relevante en aplicaciones donde el cemento esté expuesto a ambientes cálidos o donde el calor generado por procesos como el fraguado sea significativo.

4.2 Simulaciones de campos magnéticos y transferencia de calor con pruebas de cemento en COMSOL Multiphysics

4.2.1 Campos magnéticos una bobina de aire multicapa

Resultados preliminares (sin tubo intermedio)

Mediante el uso de la simulación de la sección 2.2.1 una bobina de aire multicapa en COMSOL Multiphysics, se modificaron algunos parámetros iniciales, para adecuarla a valores reales de bobina y cable, dados en los datos experimentales del equipo de trabajo. Dichos valores se pueden observar en la tabla 12.

Tabla 12 Parámetros experimentales a utilizar en la bobina de aire multicapa

Parámetros		
Nombre	Expresión	Valor
Wcoil	125[mm]	0.125 m
Ncoil	40	40
Ipeak	5[A]	5 A
Zplane	-Wcoil/2	-0.0625 m
Rext	56[mm]	0.056 m
Rint	50[mm]	0.05 m

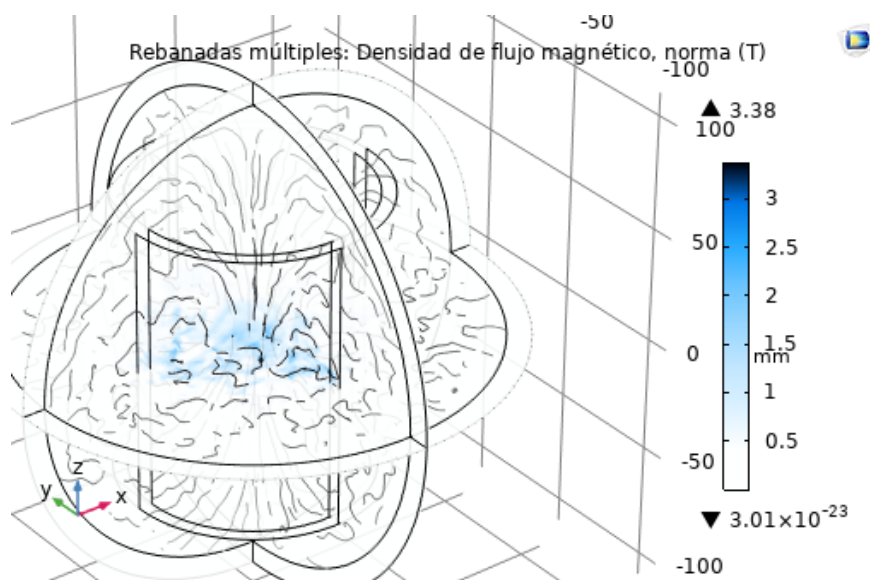


Figura 65 Campos magnéticos de la simulación de una bobina de aire multicapa en COMSOL Multiphysics

Análisis de la figura 65:

1. Contexto del modelo:

Se observa un volumen tridimensional con una representación de la densidad de flujo magnético dentro y alrededor de una bobina (o estructura cilíndrica central).

Las líneas curvas representan las líneas de flujo magnético que se distribuyen de manera desigual en el espacio.

2. Leyenda de valores:

Los colores indican la magnitud de la densidad de flujo magnético en teslas (T).

Los valores oscilan entre $3.01 \times 10^{-23} \text{ T}$ (en azul claro) y 3.38 T (en azul oscuro).

3. Región más intensa:

Las áreas en azul oscuro representan los puntos de mayor concentración del flujo magnético (alta densidad), localizados cerca del centro del sistema.

4. Ejes coordenados:

Los ejes x, y, z indican un sistema tridimensional con mediciones espaciales precisas, en mm.

En conclusión 3.38 T es un valor bastante alto para una bobina de cobre en aire, ya que el campo en bobinas de uso industrial o laboratorio típicamente va de mT a unas pocas T. Un campo de más de 3 T es comparable al de un imán de resonancia magnética (MRI) o electroimanes de alta potencia.

Aplicaciones posibles

1. Calentamiento por inducción:

Este tipo de simulación es útil para evaluar el comportamiento del campo magnético en sistemas diseñados para calentar materiales mediante inducción.

2. Diseño de dispositivos electromagnéticos:

El análisis puede ser relevante para optimizar bobinas en transformadores, motores eléctricos o inductores.

3. Estudio de materiales:

Los resultados pueden proporcionar información sobre la interacción de materiales específicos con el campo magnético.

Resultados preliminares (con tubo intermedio)

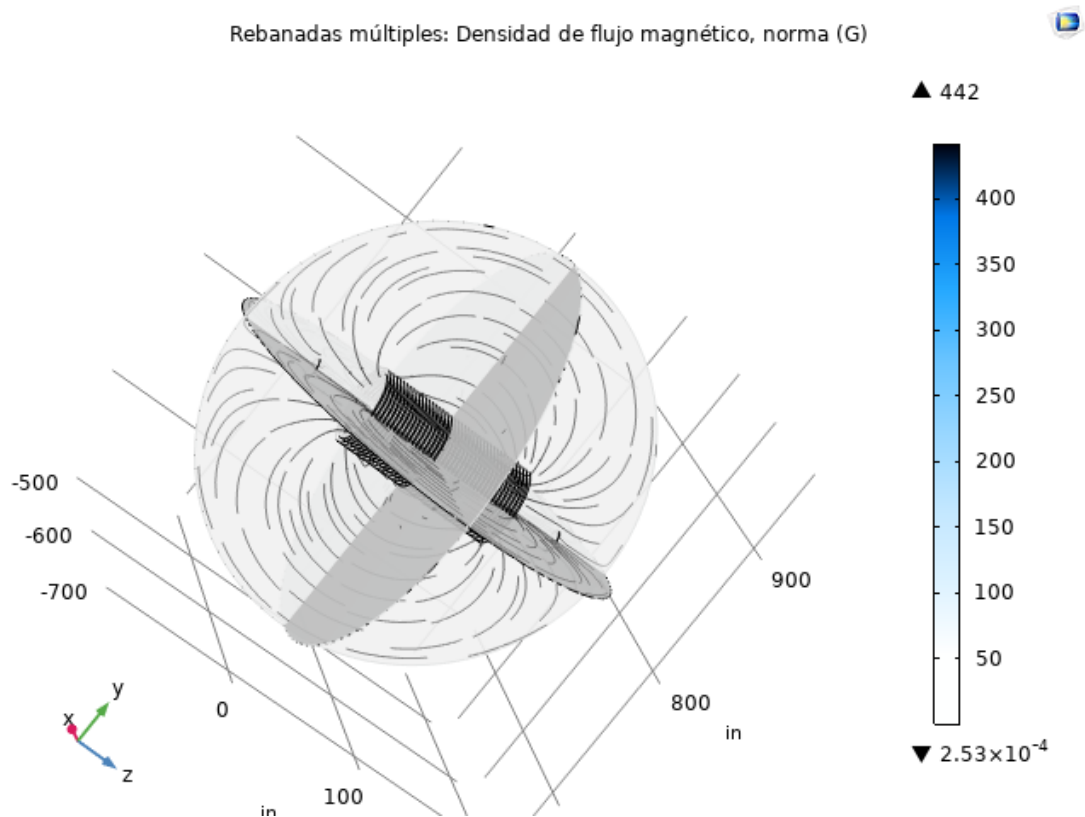


Figura 466 Campos magnéticos en Gauss en el estudio con tubo intermedio

El rango de densidad de flujo magnético varía de 2.53×10^{-4} G (valor mínimo en blanco) hasta 442 G (valor máximo en azul oscuro) (figura 66). Las regiones con mayor intensidad de flujo magnético se encuentran alrededor del núcleo central, posiblemente asociado a una bobina o una fuente electromagnética. Las líneas de flujo se concentran y son más densas cerca del centro, indicando un área de mayor intensidad magnética. El campo se dispersa y debilita conforme se aleja del núcleo, como se esperaría en sistemas electromagnéticos.

Podríamos concluir que si se está evaluando la interacción entre el campo magnético y un material adicional (por ejemplo, cemento o un tubo metálico), estos datos son útiles para entender cómo se distribuye el flujo.

4.2.2 Transferencia de calor en la bobina

Se logró realizar la simulación con éxito. Se realizó la simulación con un calentamiento de 56 s, llegando a una temperatura aproximada de 27 °C. Se modificó el tiempo de calentamiento a 120 s en una segunda prueba, llegando a una temperatura de 34°C, ver figura 67.

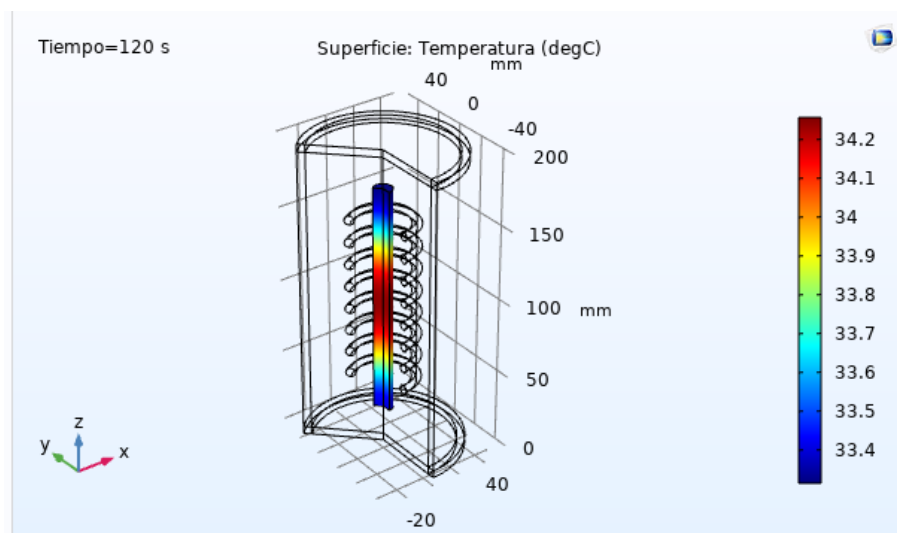


Figura 47 Temperaturas alcanzadas en la simulación para la bobina y tubo interior a 120 segundos

En este caso se trabajó con una frecuencia de 30 kHz y voltaje de 30 V, y se comparó estos resultados con los resultados experimentales.

Tiempo=56 s

Superficie: Temperatura (degC)

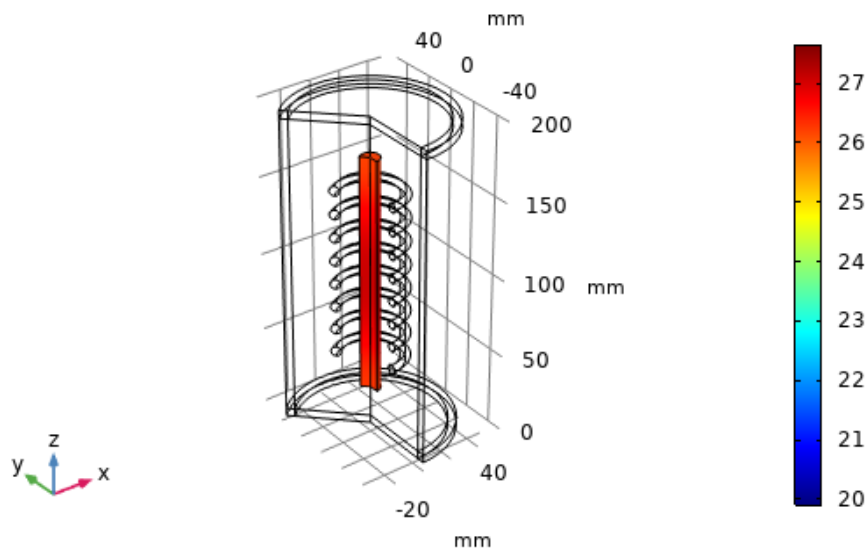


Figura 48 Temperaturas alcanzadas en la simulación para la bobina y tubo interior para 56 segundos.

La mayor temperatura se encuentra concentrada en el tubo central, lo que indica que el calor generado por la inducción electromagnética se transfiere eficientemente al material del tubo. Las temperaturas más bajas (zonas azules) están presentes fuera del tubo, en las regiones alejadas de la fuente de calor. El gradiente térmico sugiere una transferencia de calor desde el tubo hacia las áreas circundantes, lo cual es consistente con la conducción térmica. La temperatura máxima alcanzada (27 °C) indica que el sistema de inducción logra calentar el tubo dentro del tiempo simulado (56 segundos), ver figura 68. Comparando los resultados de las figuras 67 y 68 se observa que a mayor tiempo hay mayor calentamiento del tubo interior, aumentando de 27 °C a 34.2 °C en 64 segundos.

Se realizaron pruebas con diferentes materiales para observar la transferencia de calor en el tubo intermedio de la bobina como se muestra en la figura 69.

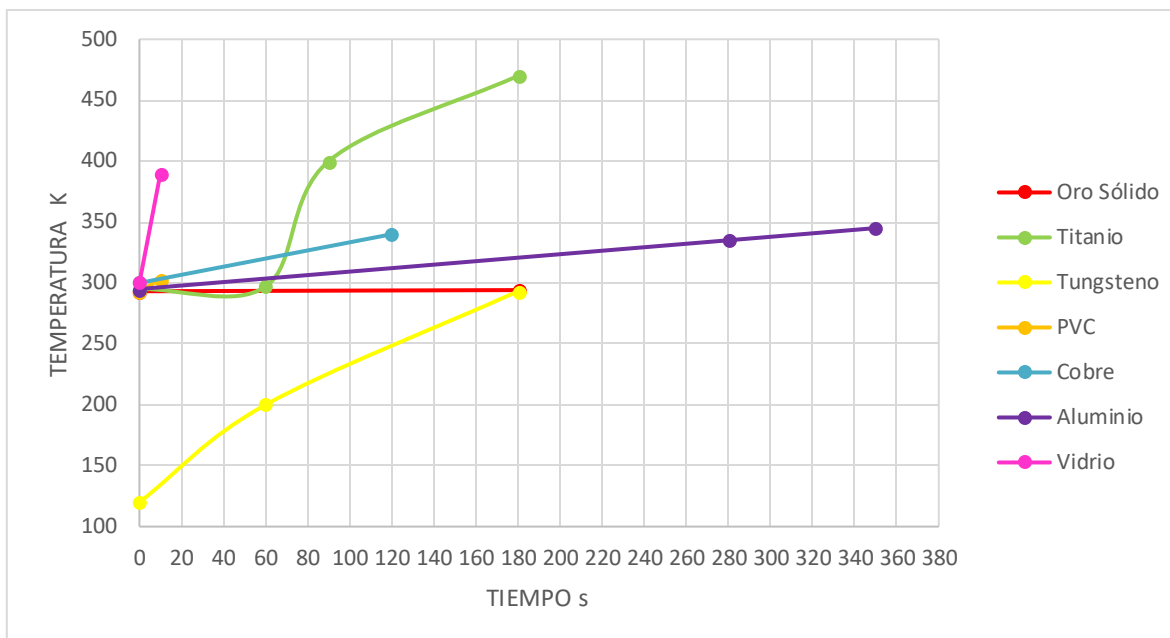


Figura 69 Comparación de la transferencia de calor para diversos materiales en el tubo interior de la bobina de aire multicapa

Se puede observar que el oro sólido se calienta lentamente, aún pasados tres minutos solo aumentó 1.1 grados Kelvin, por lo que su calentamiento es lento y lineal. Durante el primer minuto, el Titanio aumenta dos grados Kelvin, pero a medida que va transcurriendo el tiempo, podemos notar un gran aumento en su temperatura. El tiempo final de esta prueba con Titanio fue de tres minutos y su temperatura final fue de 470 grados Kelvin, por lo que se logra observar un visible aumento de Temperatura. El Tungsteno, en comparación con los otros materiales de prueba, tiene una temperatura inicial menor que los demás, puesto que en el segundo cero su temperatura es de 120 grados Kelvin. En el primer minuto aumentó tan solo 80 grados más, llegando a 200°K. Al finalizar la prueba y transcurridos tres minutos, su temperatura final fue de 293.15°K. Por lo que su temperatura aumentó más rápido en el primer minuto que en los minutos siguientes. El Aluminio tan solo aumentó 40°K en un rango de cero segundos a cuatro minutos con cuarenta segundos, con respecto a su temperatura inicial. El tiempo final de prueba fue de cinco minutos con cincuenta segundos y su temperatura final fue de 345°K.

Diferencias entre materiales

Metales

El tungsteno alcanza la temperatura más alta, lo que refleja su alta capacidad para conducir el calor.

El cobre y el aluminio muestran un comportamiento más gradual y estable, con incrementos más uniformes.

El oro sólido se mantiene alrededor de 300 K, posiblemente debido a su excelente conductividad térmica y capacidad calorífica equilibrada.

No metales

El vidrio muestra un cambio abrupto inicial, lo que podría relacionarse con una rápida absorción de calor hasta alcanzar un equilibrio.

El PVC tiene una pendiente moderada, indicando que su capacidad para acumular calor es más limitada en comparación con los metales.

Estabilidad térmica

Materiales como el titanio y el cobre parecen alcanzar un equilibrio térmico más rápido, estabilizándose a temperaturas más bajas en comparación con el tungsteno y el vidrio.

Velocidad de calentamiento

El cobre y el vidrio muestran cambios iniciales significativos, reflejando una rápida absorción de energía térmica.

El tungsteno tiene una curva de calentamiento acelerada, lo que coincide con su alta conductividad térmica y resistencia a altas temperaturas.

En general, los resultados de este estudio proporcionan información valiosa para la selección de materiales en sistemas donde el manejo de calor es crucial, como en procesos de calentamiento por inducción, transferencia térmica y aplicaciones industriales. La elección del material dependerá de las propiedades específicas

requeridas, como conductividad térmica, capacidad calorífica, y estabilidad frente a altas temperaturas.

4.3 Simulaciones del fraguado del cemento en COMSOL Multiphysics

Utilizamos la aplicación HET²² para simular el proceso de fraguado del cemento empleando datos experimentales obtenidos previamente de un experimento donde se irradió una muestra de cemento con un láser de CO₂. En dicho experimento, la radiación del láser se utilizó para calentar la muestra y generar un perfil térmico controlado, lo que permitió evaluar cómo las condiciones de temperatura afectan el comportamiento del material durante su fraguado. Los datos experimentales se encuentran detallados en la bibliografía correspondiente [18].

Los datos experimentales, que incluyen la distribución de temperatura y las propiedades térmicas del cemento bajo irradiación láser, fueron integrados en el modelo de simulación desarrollado en HET²². Este enfoque permitió analizar de manera detallada la cinética de fraguado, así como los gradientes térmicos presentes en el sistema.

El uso de HET²² nos permitió validar los resultados experimentales y explorar diferentes escenarios de fraguado bajo condiciones térmicas controladas. Además, esta metodología proporcionó una herramienta útil para optimizar procesos relacionados con el cemento, considerando factores como la distribución uniforme del calor y las características mecánicas finales del material.

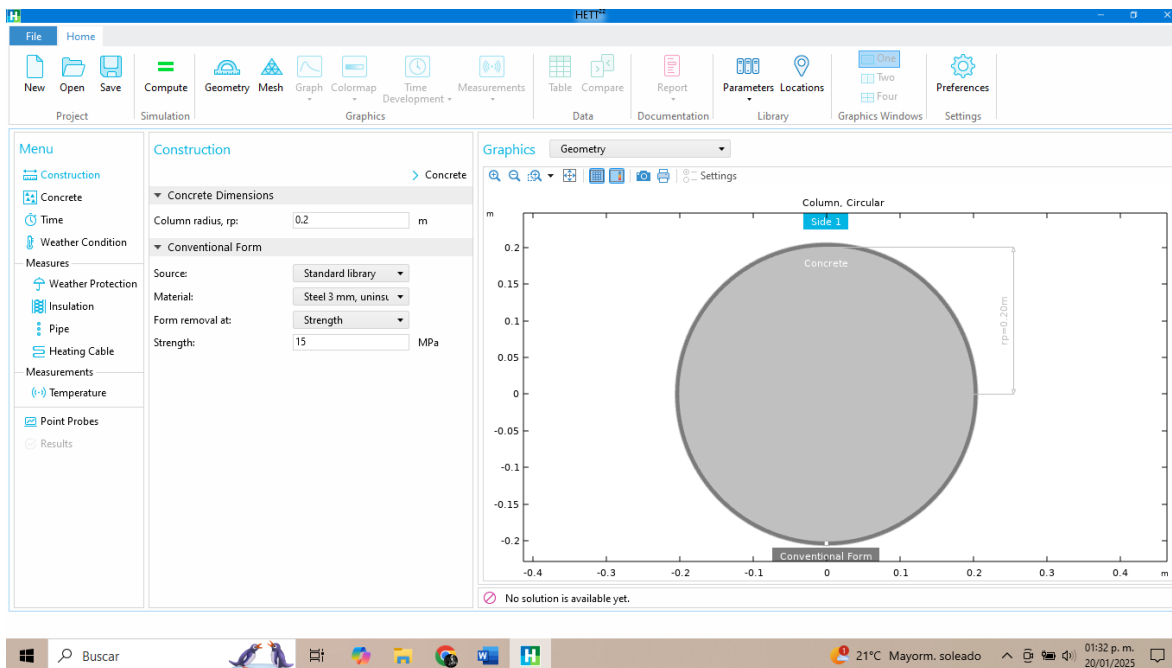


Figura 70 Geometría circular seleccionada para la simulación del fraguado el cemento en HET²²

Se utilizó un radio de 0.20 m con un material que cubre el cemento de Steel 3 mm sin aislar con una fuerza de 15 MPa, se eligió geometría de forma circular para dar el aspecto más parecido a los datos experimentales, ver figura 70. Para el concreto se eligió el tipo STD-FA ya que es el más común y usado en Noruega y su temperatura será de 20°C constantes. Algunas cualidades de este cemento son las siguientes: bien adaptado para construcciones con requisitos de alta resistencia final, puede usarse en combinación con agregados reactivos alcalinos, desarrollo de calor relativamente bajo, muy adecuado para su uso en construcciones masivas, muy buena trabajabilidad y durabilidad, se puede observar en la tabla 13 algunas propiedades de dicho cemento.

Tabla 13 Propiedades del cemento a utilizar con HET²²

<i>Propiedades</i>	<i>Valores declarados</i>
<i>Finura (Blaine m²/kg)</i>	450
<i>Peso específico (kg/dm³)</i>	3.00
<i>Estabilidad de volumen (mm)</i>	1
<i>Tiempo inicial de fraguado (min)</i>	150
<i>Resistencia a la compresión (MPa)</i>	
1 día	19
2 días	29
7 días	40
28 días	53
<i>Sulfato (% SO₃)</i>	≤4.0
<i>Cloruro (% Cl⁻)</i>	≤0.085 (B) / ≤0.05 (K)
<i>Cromo soluble en agua (ppm Cr⁶⁺)</i>	≤2
<i>Álcalis (% Na₂Oeq)</i>	1.4 (B) / 1.5 (K)
<i>Clinker (%)</i>	76
<i>Ceniza volante (%)</i>	18
<i>Caliza (%)</i>	6

Tiempo y clima

Se realizaron varias pruebas con diferentes condiciones de temperatura (°C), para las demás condiciones y datos de entrada se utilizará los valores predeterminados del programa, con una humedad del 21% y velocidad del viento de 6.39 m/s, ver figuras 71, 72, 73, 74, 75 y 76.

Con dicha información la aplicación es capaz de mostrarnos de manera visual una gráfica para predecir el comportamiento de la temperatura del fraguado con respecto al tiempo.

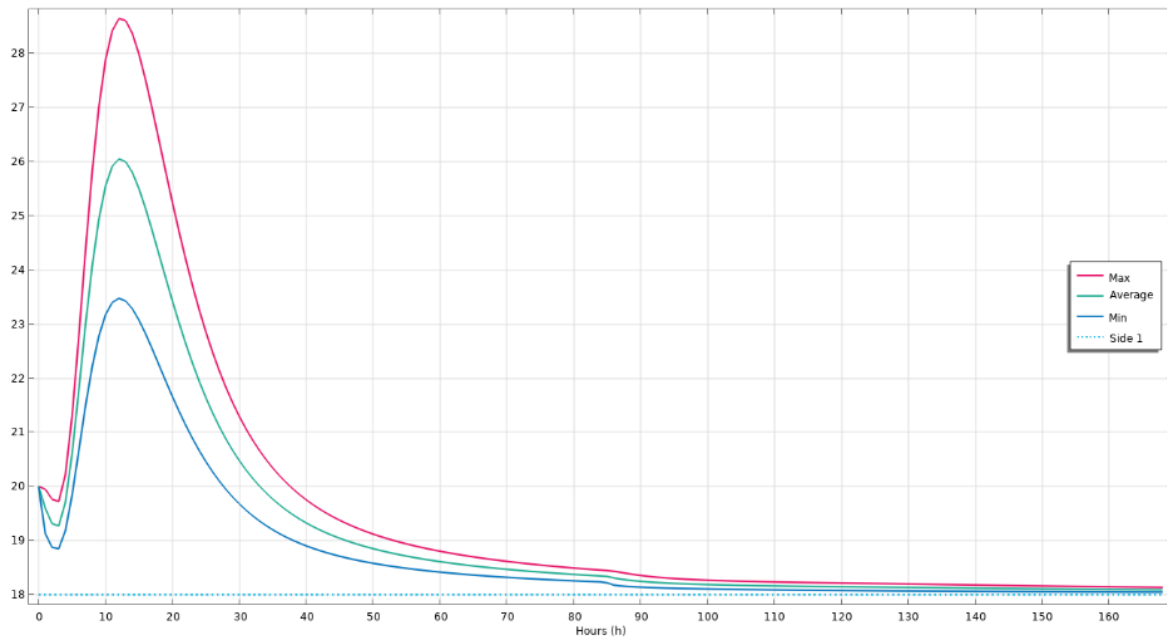


Figura 71 Variación de la temperatura (en °C) con respecto al tiempo (en horas), como resultado de la simulación del fraguado del cemento con temperatura ambiental de 18°C en HET²²

Descripción general del gráfico

1. Ejes:

Eje X (Horas): Representa el tiempo en un rango de 0 a 160 horas.

Eje Y (Temperatura): Muestra la temperatura en °C, variando de 18 a 28 °C.

2. Curvas representadas:

Max (rojo): Indica la temperatura máxima observada durante el experimento o simulación.

Average (verde): Representa la temperatura promedio.

Min (azul): Refleja la temperatura mínima.

Side 1 (línea punteada azul): Podría ser un valor representativo de un lado o área específica del sistema.

Análisis del comportamiento térmico

1. Incremento inicial:

Todas las curvas muestran un aumento inicial de temperatura, alcanzando un pico alrededor de las **10 a 20 horas**. Este comportamiento es típico en sistemas donde hay un aporte inicial de energía térmica, como irradiación o fraguado.

2. Pico térmico:

La temperatura máxima alcanzada es cercana a los **28 °C**, registrada en la curva de **Max**. Las temperaturas promedio y mínima tienen picos más bajos, alrededor de **26 °C** y **24 °C**, respectivamente.

3. Disminución y estabilización:

Después del pico, todas las curvas muestran una disminución progresiva, estabilizándose cerca de los **18 °C** después de las **80 horas**. Esto podría indicar la disipación del calor hacia el ambiente o la finalización del proceso térmico (como el fraguado o enfriamiento).

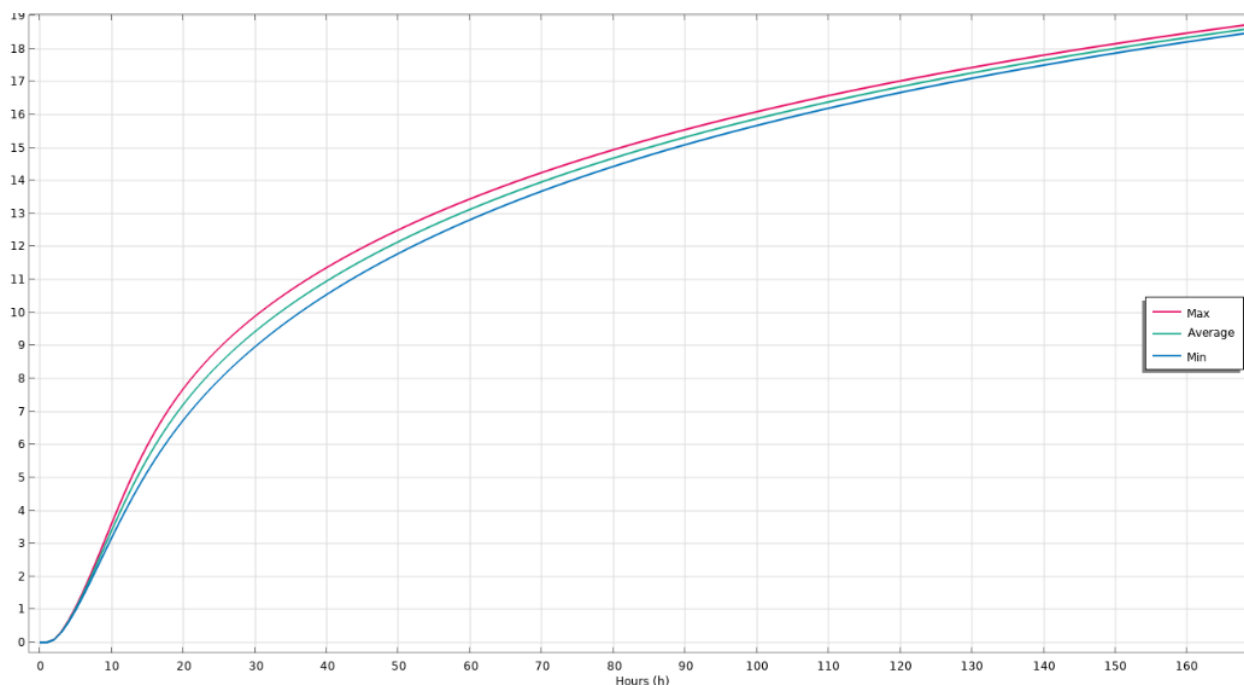


Figura 72 Resistencia (en MPa) en función del tiempo (en horas) como resultado de la simulación del fraguado del cemento a 18°C en HET²²

La resistencia del cemento se refiere a la capacidad del material para soportar cargas sin romperse, agrietarse o deformarse de forma permanente. Después del fraguado, comienza el proceso de endurecimiento, que es donde el cemento

realmente desarrolla su resistencia mecánica. Esto sucede a través de una serie de reacciones químicas llamadas hidratación, en las que el cemento reacciona con el agua y forma nuevos compuestos que le dan rigidez y resistencia.

Descripción general de la figura 72

1. Ejes:

Eje X (Horas): Muestra el tiempo en un rango de 0 a 160 horas.

Eje Y (Resistencia en MPa): La resistencia varía desde 0 hasta 19 MPa.

2. Curvas representadas:

Max (rojo): Indica la resistencia máxima observada en el sistema.

Average (verde): Representa la resistencia promedio.

Min (azul): Refleja la resistencia mínima.

Análisis del comportamiento

1. Crecimiento inicial rápido:

Las tres curvas muestran un incremento rápido de la resistencia durante las primeras **40 horas**, alcanzando aproximadamente entre 8 y 10 MPa. Esto podría deberse a un proceso inicial acelerado, como el fraguado temprano en el cemento o concreto.

2. Incremento gradual posterior:

Después de las 40 horas, la tasa de crecimiento de la resistencia disminuye, mostrando una pendiente más suave. Esto refleja la transición hacia etapas más lentas del proceso, como el endurecimiento final o la hidratación de compuestos secundarios.

3. Diferencia entre curvas:

La diferencia entre las curvas de **Max**, **Average** y **Min** es pequeña, lo que indica una distribución relativamente uniforme de la resistencia en el sistema.

4. Estabilización:

Las curvas comienzan a estabilizarse hacia las **160 horas**, alcanzando valores máximos cercanos a los 19 MPa para la resistencia máxima.

Interpretación física

1. Desarrollo de resistencia:

Este comportamiento es típico en materiales como el cemento, donde la hidratación de los compuestos genera una ganancia progresiva de resistencia. El incremento rápido inicial está asociado a la hidratación del silicato tricálcico (C3S), mientras que el aumento gradual posterior puede estar relacionado con la hidratación del silicato dicálcico (C2S).

2. Diferencias mínimas en resistencia:

La cercanía entre las curvas indica una buena homogeneidad del material en términos de distribución de propiedades mecánicas.

3. Valor final:

Una resistencia máxima de **19 MPa** es consistente con materiales que están en etapas tempranas o intermedias de curado, dependiendo de la mezcla y las condiciones del experimento.

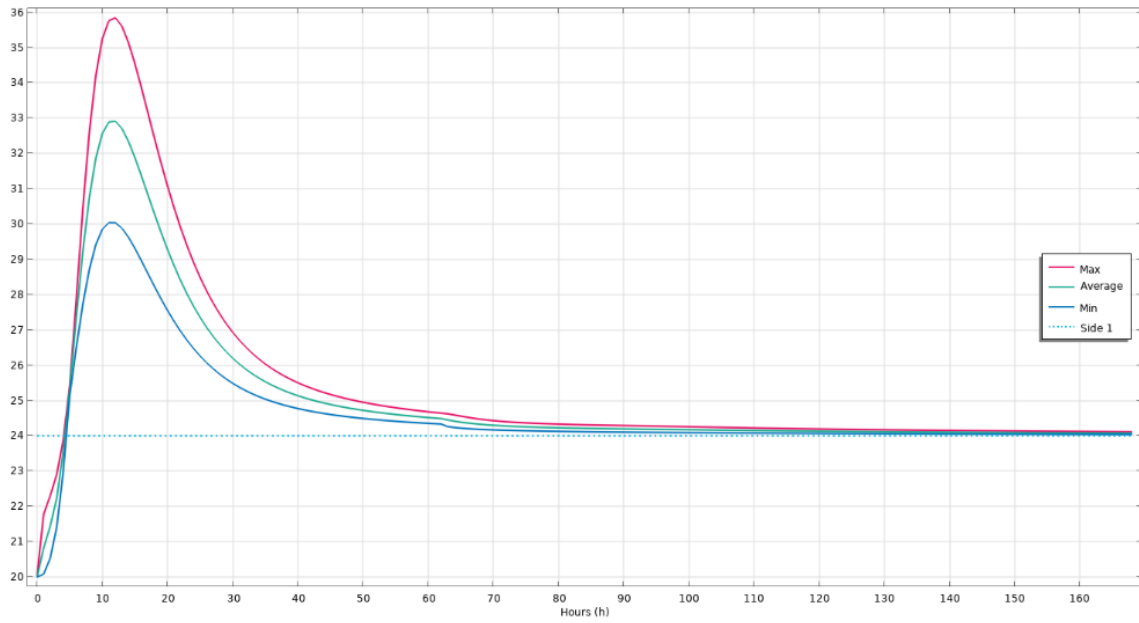


Figura 73 Variación de la temperatura (en °C) con respecto al tiempo (en horas), como resultado de la simulación del fraguado del cemento a 24°C en HET²²

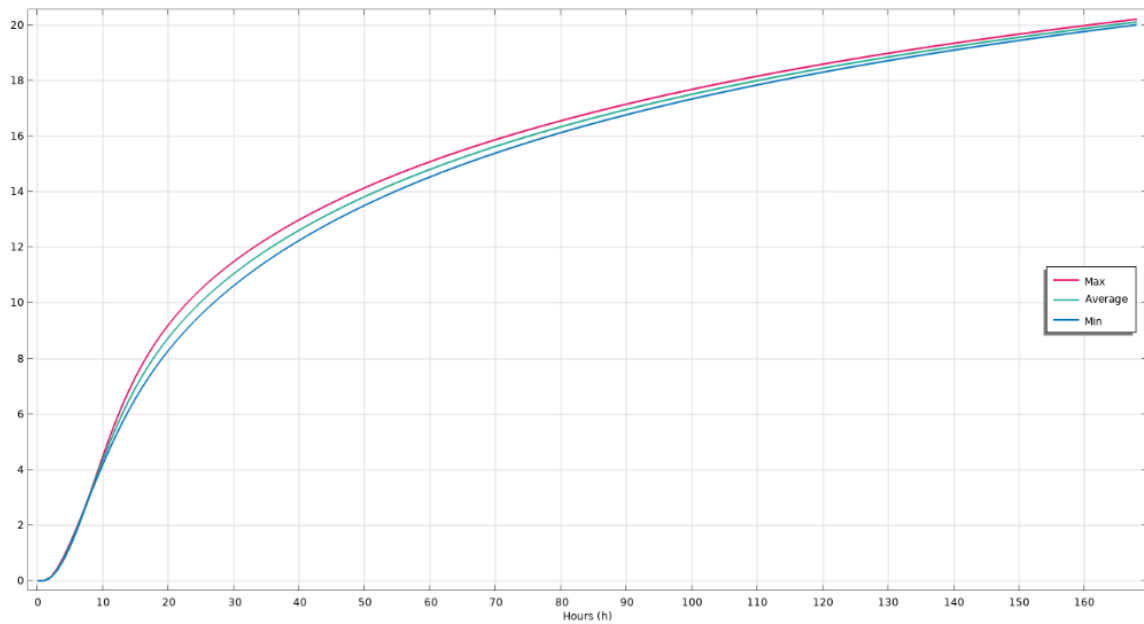


Figura 74 Resistencia (en MPa) en función del tiempo (en horas) como resultado de la simulación del fraguado del cemento a 24°C en HET²²

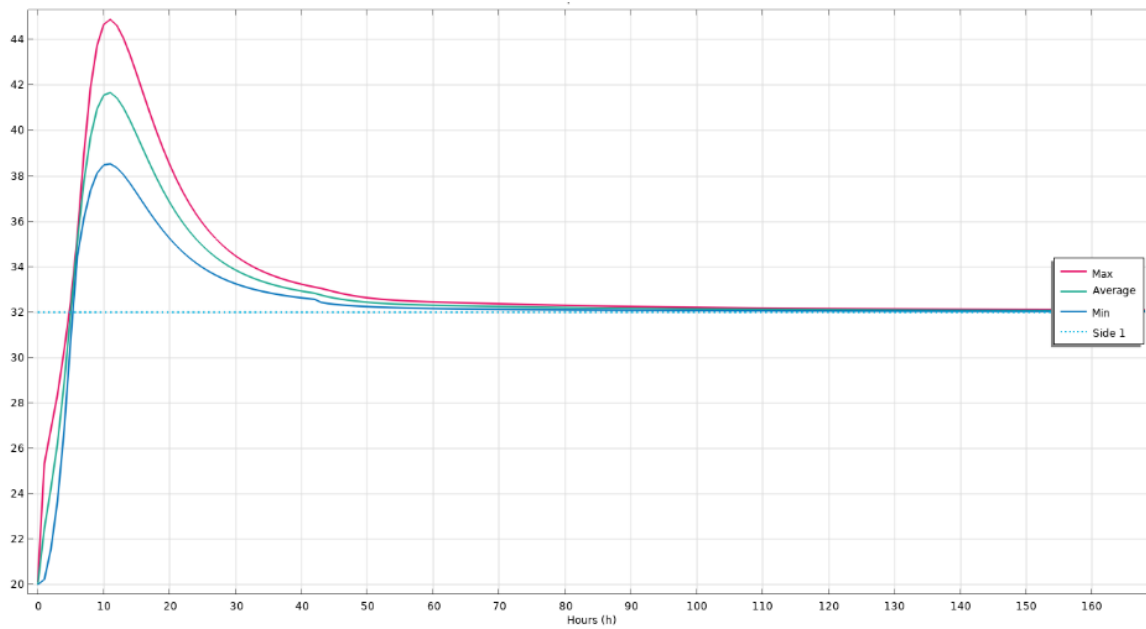


Figura 75 Variación de la temperatura (en °C) con respecto al tiempo (en horas), como resultado de la simulación del fraguado del cemento a temperatura ambiental de 32°C en HET²²

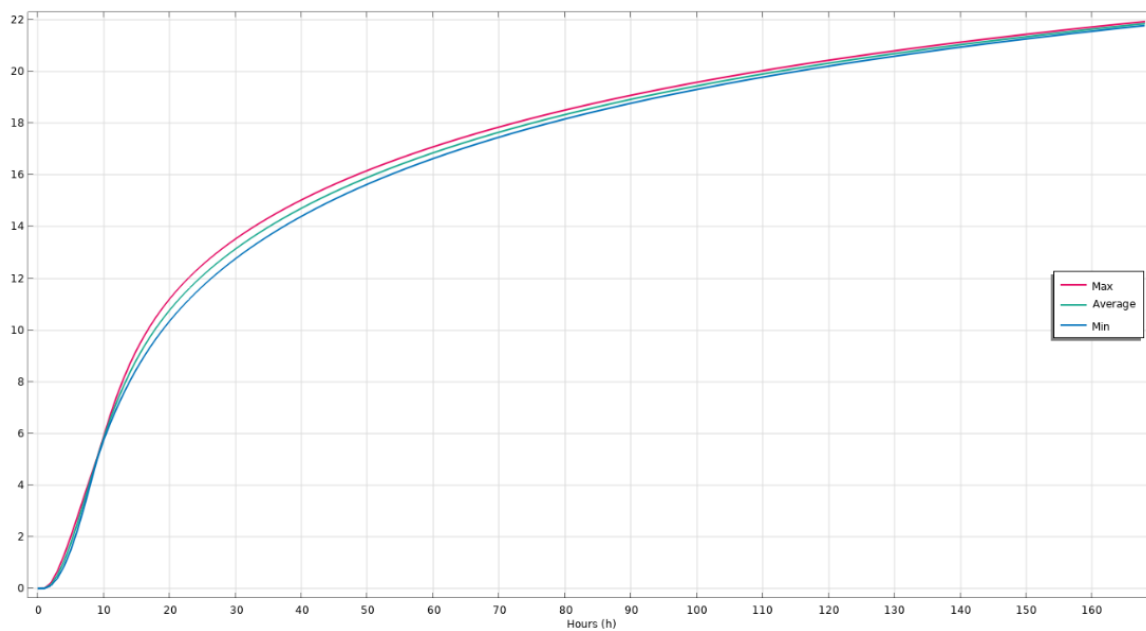


Figura 76 Resistencia (en MPa) en función del tiempo (en horas) como resultado de la simulación del fraguado del cemento a temperatura ambiental de 32°C en HET²²

Análisis de la Temperatura en Función del Tiempo

1. Tendencia General:

- La temperatura presenta un aumento inicial que alcanza un **pico máximo entre las 10 y 20 horas**, seguido de un descenso gradual hacia un equilibrio térmico después de **80 horas**.
- Este comportamiento es característico de procesos exotérmicos como el fraguado del cemento, donde la liberación inicial de calor es producto de la hidratación de los componentes principales del cemento.

2. Pico Máximo de Temperatura:

- La temperatura máxima varía dependiendo de la simulación, pero típicamente se encuentra en el rango de **28-32 °C**.
- Este valor está influenciado por la temperatura inicial del sistema y refleja la intensidad de las reacciones químicas iniciales.

3. Estabilización Térmica:

- Después de aproximadamente **80 horas**, el sistema alcanza una temperatura constante cercana a la inicial, lo que indica la finalización de las reacciones térmicamente activas.

4. Variación por Temperatura Inicial:

- Las simulaciones realizadas a diferentes temperaturas iniciales (18 °C, 24 °C, 32 °C) muestran que un aumento en la temperatura inicial acelera el tiempo para alcanzar el pico térmico, pero también incrementa la intensidad de las reacciones exotérmicas.

Análisis de la Resistencia en Función del Tiempo

1. Incremento Inicial:

- La resistencia del cemento aumenta rápidamente durante las primeras **40 horas**, alcanzando aproximadamente entre **8 y 12 MPa**, dependiendo de las condiciones de temperatura inicial.

2. Crecimiento Gradual:

- Después de las 40 horas, el incremento de resistencia se vuelve más lento y estabiliza cerca de **18-19 MPa** al final de la simulación (160 horas).
- Este comportamiento corresponde al endurecimiento final del cemento, dominado por la hidratación de compuestos secundarios como el silicato dicálcico (C2S).

3. Influencia de la Temperatura Inicial:

- Las temperaturas iniciales más altas conducen a un desarrollo más rápido de la resistencia en las primeras horas, pero no necesariamente aumentan la resistencia final alcanzada.

4. Uniformidad de la Resistencia:

- Las diferencias entre los valores máximo, promedio y mínimo de resistencia son pequeñas, indicando un sistema homogéneo en términos de propiedades mecánicas.

Capítulo 5. Conclusiones y trabajo futuro

5.1 Conclusiones y recomendaciones para la simulación en Aspen Plus®

El simulador escogido presenta diversas ventajas y desventajas para simular el proceso de fraguado de forma apegada a la realidad. Entre opiniones sobre el simulador, se necesita facilidad de introducción de datos, ya que se hizo la suposición de que los compuestos minerales complejos funcionan como “un todo” al componerse de otros compuestos que sí estaban presentes en la base de datos. Aplicar este método facilitó en gran medida la introducción de componentes y la introducción de las reacciones de hidratación, a pesar del gran número de compuestos usado.

Para introducir las reacciones de hidratación, el simulador ofrece distintos tipos de reactores dependiendo de los datos cinéticos que se conozcan, y para este caso, donde la ausencia de datos cinéticos fue importante, la opción del uso de los reactores estequiométricos en los cuales únicamente se requiere un compuesto que se consuma y una conversión, fue la más factible para lograr simular las reacciones y obtener datos cuantitativos no sólo de los minerales complejos, sino de cada compuesto que los conforma.

La herramienta de análisis de sensibilidad, de uso práctico e intuitivo, permitió conocer directa y rápidamente la relación entre dos variables tales como la relación agua/cemento y la composición final del cemento sin necesidad de modificar nuevamente la introducción de datos.

El simulador escogido es una excelente herramienta para imitar procesos químicos en líquidos y gases, sin embargo, la fase sólida es bastante general, y desde el comienzo del proceso de introducción de datos, donde se exploraba la idea de realizar el esquema del compuesto sólido, no se tenía una opción para introducir los

enlaces de los complejos cristales sólidos, por lo que, al prescindir de la estructura química, se necesitó buscar otra ruta de introducción.

Además, el simulador no posee herramientas para evaluar propiedades mecánicas, como la compresión o la tensión, propiedades de gran relevancia para el estudio del fraguado del cemento.

5.2 Conclusiones y recomendaciones para la simulación de campos magnéticos y transferencia de calor con COMSOL Multiphysics

Las regiones de mayor intensidad de flujo magnético se concentran alrededor del núcleo central, indicando que la configuración del sistema (bobina multicapa) es eficiente para generar campos fuertes en esta zona.

La intensidad máxima registrada fue de **442 G**, mientras que las áreas más externas mostraron valores mucho menores, con un mínimo de **2.53×10^{-4} G**, evidenciando la disipación esperada del campo magnético.

Incorporar un tubo intermedio de cobre mejoró la distribución del flujo magnético y permitió estudiar cómo los materiales interactúan con el campo. Este diseño es adecuado para sistemas que requieren una transferencia eficiente de energía magnética, como en calentamiento por inducción.

Estos resultados son útiles para optimizar dispositivos electromagnéticos (como inductores y transformadores) y para diseñar sistemas de calentamiento eficientes en procesos industriales.

El tubo intermedio de cobre alcanza una temperatura máxima de **27 °C** en 56 segundos durante el calentamiento por inducción. En pruebas extendidas a 120 segundos, la temperatura máxima alcanzada fue de **34 °C**, lo que demuestra una transferencia térmica eficiente en este tiempo limitado.

El tungsteno alcanzó las temperaturas más altas, reflejando su excelente conductividad térmica. El cobre y el aluminio mostraron comportamientos más graduales y estables, siendo ideales para aplicaciones de transferencia térmica

uniforme. El oro sólido demostró un calentamiento más lento, pero estable, debido a su alta capacidad calorífica. El vidrio presentó un aumento rápido de temperatura inicial, reflejando una rápida absorción de calor. El PVC mostró un calentamiento lineal y moderado, indicando una capacidad térmica limitada. Materiales como el titanio y el cobre alcanzaron el equilibrio térmico más rápido, mientras que el tungsteno y el vidrio mostraron mayor capacidad para manejar temperaturas elevadas.

La resistencia aumentó rápidamente en las primeras 40 horas, alcanzando valores de **8 a 12 MPa**, seguido de un crecimiento gradual que se estabilizó cerca de **19 MPa** a las 160 horas.

Este comportamiento es típico en el fraguado de cementos hidráulicos y refleja un balance entre reacciones químicas iniciales rápidas y un endurecimiento posterior más lento.

Los resultados de las simulaciones mostraron una alta correlación con los datos experimentales, validando la capacidad del modelo para predecir tanto la transferencia de calor como el desarrollo mecánico en sistemas de fraguado.

5.3 Conclusiones y recomendaciones para la simulación del fraguado del cemento en HET²²

El incremento inicial de temperatura está directamente relacionado con el desarrollo temprano de la resistencia, lo que sugiere que un control preciso de la temperatura inicial puede optimizar el fraguado.

A temperaturas iniciales más altas, el sistema reacciona más rápido, alcanzando su pico térmico y los valores iniciales de resistencia en menor tiempo. Esto puede ser útil en aplicaciones que requieren un rápido desarrollo de resistencia.

Los valores estabilizados de temperatura y resistencia reflejan un material que ha completado su proceso de fraguado y endurecimiento, mostrando una buena uniformidad. Estos resultados pueden utilizarse para optimizar las condiciones de curado del cemento en función de los requisitos específicos de resistencia y tiempo.

Según la ASTM C150, el tiempo de fraguado inicial para cementos hidráulicos debe ser de al menos 45 minutos, y el fraguado final no debe exceder las 10 horas. Los resultados obtenidos muestran un incremento de temperatura que alcanza su pico entre las 10 y 20 horas, lo que sugiere que el fraguado inicial ocurre antes de este intervalo, alineándose con los estándares mencionados.

La literatura indica que el concreto adquiere aproximadamente el 65% de su resistencia a compresión a los 7 días y alcanza su resistencia total a los 28 días.

Esta tendencia es consistente con la literatura, que indica un rápido desarrollo de resistencia en los primeros días, seguido de una ganancia más lenta hasta alcanzar la resistencia total alrededor de los 28 días.

Los datos obtenidos a diferentes temperaturas iniciales (18 °C, 24 °C, 32 °C) muestran que temperaturas más altas aceleran el tiempo para alcanzar el pico térmico y el desarrollo inicial de resistencia, lo que concuerda con los hallazgos bibliográficos.

En conclusión, los resultados de simulación están en buena concordancia con los datos reportados en la literatura científica. El comportamiento observado en términos de tiempos de fraguado, desarrollo de resistencia y efectos de la temperatura refleja las tendencias generales documentadas para cementos hidráulicos. Esto sugiere que estas simulaciones son representativas y pueden ser utilizadas para predecir el comportamiento del cemento bajo diversas condiciones de curado.

Estos resultados demuestran que los sistemas estudiados (bobinas, transferencia térmica y fraguado de cemento) son eficientes y consistentes con los principios físicos esperados. Las aplicaciones de estos hallazgos incluyen:

- Optimización de sistemas de calentamiento por inducción para materiales con características térmicas específicas.
- Mejora en los procesos de curado y fraguado de cementos bajo condiciones térmicas controladas.

- Desarrollo de dispositivos electromagnéticos para aplicaciones industriales y de transferencia térmica.

5.4 Conclusión general

Los resultados obtenidos en esta investigación confirman que la simulación computacional es una herramienta efectiva para analizar y predecir el comportamiento del cemento en diversas condiciones de fraguado y curado. Se evidenció que la temperatura inicial juega un papel crucial en la cinética de endurecimiento, ya que temperaturas más altas aceleran el proceso de fraguado y la ganancia inicial de resistencia, sin comprometer la resistencia final del material.

Las simulaciones realizadas con **Aspen Plus, COMSOL Multiphysics y HET²²** mostraron una alta correlación con datos experimentales, validando la capacidad predictiva de los modelos utilizados. En particular, se identificó que la temperatura máxima del proceso de fraguado ocurre entre las **10 y 20 horas** y que la resistencia a la compresión se desarrolla rápidamente en las primeras **40 horas**, alcanzando entre **8 y 12 MPa**. Posteriormente, el crecimiento es más gradual hasta estabilizarse en valores cercanos a **18-19 MPa a las 160 horas (7 días)**, lo cual es consistente con la literatura que establece que el cemento adquiere aproximadamente el **65% de su resistencia a los 7 días y su resistencia total a los 28 días**.

Asimismo, la influencia de los **campos magnéticos y la transferencia de calor** en las pastas de cemento fue un aspecto innovador de la investigación. Se demostró que la combinación de calentamiento por inducción y control de temperatura podría ser una estrategia viable para optimizar el curado del cemento y mejorar su desempeño en aplicaciones específicas.

En conclusión, este estudio proporciona una base sólida para la aplicación de modelos computacionales en la optimización del diseño y comportamiento de materiales cementantes. Los hallazgos pueden ser aplicados en el desarrollo de procesos de construcción más eficientes y sostenibles, con la posibilidad de mejorar

el rendimiento mecánico y térmico del cemento bajo distintas condiciones ambientales.

5.5 Trabajos Futuros

A partir de los resultados obtenidos y el análisis realizado en esta tesis, se identifican diversas áreas de oportunidad para continuar con la investigación y ampliar el conocimiento en el campo de las pastas de cemento y su interacción con la luz difusa. Las siguientes líneas de investigación se proponen como trabajos futuros:

1. **Optimización de modelos de simulación:** Aunque se lograron resultados relevantes con Aspen Plus, COMSOL Multiphysics y HET²², es posible explorar otros softwares de simulación y ajustar parámetros más detallados para mejorar la precisión de los modelos. Esto incluye la integración de técnicas de inteligencia artificial y aprendizaje automático para analizar patrones complejos en los datos obtenidos.
2. **Estudio de nuevos materiales y aditivos:** Ampliar el análisis para incluir diferentes tipos de cementos, como cementos geopozolánicos o con aditivos novedosos. Esto permitirá evaluar cómo varían las propiedades mecánicas, térmicas y ópticas en función de las características de los materiales utilizados.
3. **Evaluación en condiciones extremas:** Realizar simulaciones y experimentos físicos en condiciones ambientales más extremas, como temperaturas bajo cero o altas temperaturas, así como ambientes con alta concentración de humedad o exposición a agentes químicos agresivos.
4. **Aplicación de campos electromagnéticos en tiempo real:** Continuar el estudio del efecto de los campos magnéticos sobre las propiedades del cemento durante el fraguado, implementando experimentos a mayor escala

y en tiempo real para correlacionar los resultados simulados con datos experimentales.

5. **Desarrollo de cementos con propiedades personalizadas:** Investigar cómo la manipulación de los componentes químicos puede conducir al desarrollo de cementos con propiedades específicas, como mayor resistencia a la compresión, menor permeabilidad o un fraguado más rápido.
6. **Impacto ambiental y sustentabilidad:** Analizar el impacto ambiental de los procesos estudiados y proponer alternativas sostenibles, como la reducción del consumo de energía en el proceso de fabricación o la reutilización de subproductos industriales como aditivos en las mezclas.
7. **Validación experimental a gran escala:** Implementar pruebas a gran escala que permitan validar las simulaciones realizadas en esta investigación, con el fin de determinar su aplicabilidad directa en proyectos industriales y de infraestructura.
8. **Interacción con nuevas tecnologías:** Explorar la aplicación de tecnologías emergentes como la impresión 3D de concreto o la incorporación de sensores inteligentes para monitorear el fraguado y las propiedades del cemento en tiempo real.

En resumen, el trabajo realizado en esta tesis representa un punto de partida para investigaciones más avanzadas en el campo de los materiales de construcción. La integración de nuevas tecnologías, materiales y métodos experimentales permitirá no solo optimizar los procesos actuales, sino también explorar aplicaciones innovadoras que beneficien a la industria de la construcción y contribuyan a un desarrollo más sustentable.

Referencias

- [1] M. Sanjuán y S. Chinchón, *Introducción a la fabricación y normalización del Cemento Portland*, vol. 34. 2014.
- [2] M. Orozco, Y. Avila, S. Restrepo, y A. Parody, "Factores influyentes en la calidad del concreto: Una encuesta a los actores relevantes de la industria del hormigón", *Revista Ingenieria de Construccion*, 2018, doi: 10.4067/s0718-50732018000200161.
- [3] G. Guevara Fallas, C. Hidalgo Madrigal, M. Pizarro García, I. Rodríguez Valenciano, L. D. Rojas Vega, y G. Segura Guzmán, "Efecto de la variación agua/cemento en el concreto", *Revista Tecnología en Marcha*, vol. 25, núm. 2, p. 80, 2012, doi: 10.18845/tm.v25i2.1632.
- [4] G. D. E. A. RAUL, "DISEÑO Y CARACTERIZACION DE HORMIGONES COMPACTADOS CON RODILLO. APLICACION A LAS PRESAS DE FABRICA", *Tesis Doctoral*, 1992.
- [5] P. L. Silvestrelli y M. Parrinello, "Water molecule dipole in the gas and in the liquid phase", *Phys Rev Lett*, 1999, doi: 10.1103/PhysRevLett.82.3308.
- [6] R. a. Serway y J. W. Jewett, "Physics for Scientists and Engineers with Modern Physic, 7 ed", *Brooks/cole*, 2008, doi: 013613923X.
- [7] L. Y. Gómez-Zamorano y J. I. Escalante, "Hidratación y microestructura de cemento Portland sustituido parcialmente con sílice ultrafina", *Materiales de Construccion*, 2009, doi: 10.3989/mc.2009.46108.
- [8] B. T. Rao, H. Kumar, y A. K. Nath, "Processing of concretes with a high power CO2 laser", *Opt Laser Technol*, 2005, doi: 10.1016/j.optlastec.2004.05.001.
- [9] J. Lawrence y L. Li, "A comparative study of the surface glaze characteristics of concrete treated with CO2 and high power diode lasers: Part I: Glaze characteristics", *Materials Science and Engineering A*, 2000, doi: 10.1016/S0921-5093(00)00770-X.
- [10] H. Kariminezhad, H. Amani, y M. Moosapoor, "A laboratory study about laser perforation of concrete for application in oil and gas wells", *J Nat Gas Sci Eng*, 2016, doi: 10.1016/j.jngse.2016.04.060.

- [11] M. Gomez-Heras, R. Fort, M. Morcillo, C. Molpeceres, y J. L. Ocaña, "Calentamiento por láser: Una técnica mínimamente invasiva para el estudio del calentamiento producido por el fuego en materiales pétreos de construcción", *Materiales de Construcción*, 2008, doi: 10.3989/mc.2008.v58.i289-290.82.
- [12] P. L. Crouse, L. Li, y J. T. Spencer, "Laser-based cutting of contaminated concrete", en *Proceedings of the International Conference on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation, ICEM*, 2003. doi: 10.1115/ICEM2003-4731.
- [13] M. J. J. Schmidt, L. Li, y J. T. Spencer, "Removal of chlorinated rubber coatings from concrete surfaces using a 120-W high power diode laser", *Surf Coat Technol*, 2001, doi: 10.1016/S0257-8972(01)01161-6.
- [14] L. M. Lobo, K. Williams, E. P. Johnson, y J. T. Spencer, "Particle size analysis of material removed during CO₂ laser scabbling of concrete for filtration design", *J Laser Appl*, 2002, doi: 10.2351/1.1449884.
- [15] J. Lawrence y L. Li, "Determination of absorption length of CO₂ and high power diode laser radiation for ordinary Portland cement and its influence on the depth of melting", *Opt Laser Technol*, 2000, doi: 10.1016/S0030-3992(00)00010-4.
- [16] C. B. Ho, J. Lawrence, y L. Hao, "An investigation of the water absorption characteristics of a laser generated glaze on the ordinary portland cement surface of concrete", en *ICALEO 2003 - 22nd International Congress on Applications of Laser and Electro-Optics, Congress Proceedings*, 2003. doi: 10.2351/1.5060017.
- [17] J. Lawrence, "A comparative analysis of the wear characteristics of glazes generated on the ordinary Portland cement surface of concrete by means of CO₂ and high power diode laser radiation", *Wear*, 2004, doi: 10.1016/j.wear.2004.03.002.
- [18] M. R. Moreno-Virgen *et al.*, "Effect of CO₂ laser radiation on the mechanical properties of Portland cement pastes", *Materiales de Construcción*, 2011, doi: 10.3989/mc.2010.54709.
- [19] M. R. Moreno-Virgen *et al.*, "Influencia de la radiación láser de CO₂ en las propiedades mecánicas de pastas de cemento Portland", *Materiales de Construcción*, 2011, doi: 10.3989/mc.2010.54709.

- [20] N. Su y C. F. Wu, "Effect of magnetic field treated water on mortar and concrete containing fly ash", *Cem Concr Compos*, vol. 25, núm. 7, 2003, doi: 10.1016/S0958-9465(02)00098-7.
- [21] Y. Wang, A. J. Babchin, L. T. Chernyi, R. S. Chow, y R. P. Sawatzky, "Rapid onset of calcium carbonate crystallization under the influence of a magnetic field", *Water Res*, vol. 31, núm. 2, 1997, doi: 10.1016/S0043-1354(96)00243-6.
- [22] J. J. Soto-Bernal, R. Gonzalez-Mota, I. Rosales-Candelas, y J. A. Ortiz-Lozano, "Effects of Static Magnetic Fields on the Physical, Mechanical, and Microstructural Properties of Cement Pastes", *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2015, 2015, doi: 10.1155/2015/934195.
- [23] X. F. Pang y D. Bo, "The changes of macroscopic features and microscopic structures of water under influence of magnetic field", *Physica B Condens Matter*, vol. 403, núm. 19–20, 2008, doi: 10.1016/j.physb.2008.05.032.
- [24] V. R. Gayevskii, B. D. Nechyporuk, y S. G. Gayevska, "The influence of a permanent magnetic field on the crystallization of calcium carbonate from carbonate aqueous solutions", *Physics and Chemistry of Solid State*, vol. 24, núm. 4, 2023, doi: 10.15330/pcss.24.4.616-622.
- [25] E. J. L. Toledo, T. C. Ramalho, y Z. M. Magriotis, "Influence of magnetic field on physical-chemical properties of the liquid water: Insights from experimental and theoretical models", *J Mol Struct*, vol. 888, núm. 1–3, 2008, doi: 10.1016/j.molstruc.2008.01.010.
- [26] C. Uyeda, S. Kano, K. Hisayoshi, A. Nakanishi, y K. Kimoto, "Efficiency of magnetic alignment found in various paramagnetic and diamagnetic solids detected by simple rotational oscillation of sample in microgravity", *Mater Trans*, vol. 48, núm. 11, 2007, doi: 10.2320/matertrans.MI200711.
- [27] G. Magnel, "Los cementos de fraguado lento, endurecimiento rápido y de alta resistencia", *Anales de Ingenieria*, vol. 36, núm. 428–429, 1928.
- [28] L. Dong, N. Barth, J. P. M. Correia, y S. Ahzi, "Modeling and numerical simulation of selective laser sintering", en *2016 17th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems, EuroSimE 2016*, 2016, doi: 10.1109/EuroSimE.2016.7463376.
- [29] J. D. Coral, J. Fontalvo, y M. Á. Gómez, "Modelamiento y Simulación de Hornos Rotatorios para la Producción de Clinker", *Grupo de Investigación en*

- [30] L. P. V. Arroba, G. D. P. Coronel, y J. M. V. Amaguaña, "Structural Modeling of Straw Bale Loadbearing Wall", *ESPOCH Congresses: The Ecuadorian Journal of S.T.E.A.M.*, 2023, doi: 10.18502/epoch.v3i1.14478.
- [31] E. Cerro-Prada, M. J. Vázquez-Gallo, J. Alonso-Trigueros, y A. L. Romera-Zarza, "Modelo computacional para el proceso de hidratación del cemento en la nanoescala", *Cemento-hormigón*, vol. 80, núm. 932, 2009.
- [32] Aspen Plus, "Getting Started Modeling Processes with Solids Aspen Plus", *Toll Free*, 2012.
- [33] A. Maury, R. Sanjuán, y N. Molinares, "Desarrollo de un modelo computacional para predecir la composición de la pasta de cemento durante el proceso de fraguado", *Revista Científica Ingeniería y Desarrollo*, vol. 22, núm. 22, pp. 54-67–67, 2007.
- [34] S. Prakash y S. Kumar, "Experimental investigations and analytical modeling of multi-pass CO2 laser processing on PMMA", *Precis Eng*, 2017, doi: 10.1016/j.precisioneng.2017.02.010.
- [35] A. Gessa Perera y M. D. P. Sancha Dionisio, "Alternativas de reducción de las emisiones de dióxido de carbono (CO2) en la producción de cemento. Propuesta de un modelo de evaluación", *Innovar*, vol. 26, núm. 60, 2016, doi: 10.15446/innovar.v26n60.55532.
- [36] T. Vázquez, I. Calleja, y F. Triviño, "Contribución al estudio de las reacciones de hidratación del cemento portland por espectroscopia infrarroja. IV Hidratación del cemento con distintas proporciones de yeso y cloruro cálcico hasta 28 días", *Materiales de Construcción*, vol. 26, núm. 164, 1976, doi: 10.3989/mc.1976.v26.i164.1219.
- [37] T. Vázquez Moreno, "Contribución al estudio de las reacciones de hidratación del cemento portland por espectroscopia infrarroja", *Materiales de Construcción*, vol. 26, núm. 163, 1976, doi: 10.3989/mc.1976.v26.i163.1225.
- [38] J. Arias, T. Rengifo, y M. Jaramillo, *Manual técnico de instalaciones eléctricas de baja tensión*, vol. 1. 2009.
- [39] W. B. J. Zimmerman, "INTRODUCTION TO COMSOL MULTIPHYSICS", 2006. doi: 10.1142/9789812773302_0001.

- [40] T. C. Powers, "Estructura y propiedades físicas de la pasta de cemento fraguado", *Materiales de Construcción*, vol. 09, núm. 093, pp. 31–34, jun. 1959, doi: 10.3989/mc.1959.v09.i093.1961.
- [41] R. Salamanca Correa, "Aplicacion del Cemento Portland y los Cementos Adicionales", *Cementos portland y adicionales*, p. 7, 2008, [En línea]. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91101005>
- [42] H. E. L. Madsen, "Crystallization of calcium carbonate in magnetic field in ordinary and heavy water", *J Cryst Growth*, vol. 267, núm. 1–2, 2004, doi: 10.1016/j.jcrysgro.2004.03.051.
- [43] A. Guadalupe *et al.*, "MORTERO ARQUITECTÓNICO A BASE DE RESINA DEL ÁRBOL DE CHUKUM", *Ava Cient*, vol. VII, núm. 2, 2019.
- [44] W. C. Hansen, "Fraguado rápido y falso fraguado en los cementos portland", *Materiales de Construcción*, vol. 12, núm. 107, 1962, doi: 10.3989/mc.1962.v12.i107.1833.