



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECATRÓNICO**

**TEMA: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REÓMETRO DE CAMPO
PARA VALORACIÓN DE LAS PROPIEDADES AUTOCOMPACTANTES
EN HORMIGONES”**

AUTORES:

**GÓMEZ TORRES, KEVIN SANTIAGO
PAREDES VALLEJOS, DIEGO JAVIER**

DIRECTOR:

ING. PÁEZ FLOR, NICOLÁS MARCELO

SANGOLQUÍ

2020



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "*DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REÓMETRO DE CAMPO PARA VALORACIÓN DE LAS PROPIEDADES AUTOCOMPACTANTES EN HORMIGONES*" fue realizado por los señores: *Gómez Torres, Kevin Santiago y Paredes Vallejos, Diego Javier* el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 05 de febrero del 2020

Ing. NICOLÁS MARCELO PÁEZ FLOR

DIRECTOR

C. C.: 1714097985



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, *Gómez Torres, Kevin Santiago y Paredes Vallejos, Diego Javier*, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REÓMETRO DE CAMPO PARA VALORACIÓN DE LAS PROPIEDADES AUTOCOMPACTANTES EN HORMIGONES**” es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 05 de febrero del 2020

KEVIN SANTIAGO GÓMEZ TORRES

C.C 1727022772

DIEGO JAVIER PAREDES VALLEJOS

C.C 1002963492



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

Nosotros, *Gómez Torres, Kevin Santiago y Paredes Vallejos, Diego Javier*, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: "***DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REÓMETRO DE CAMPO PARA VALORACIÓN DE LAS PROPIEDADES AUTOCOMPACTANTES EN HORMIGONES***" en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 05 de febrero del 2020

KEVIN SANTIAGO GÓMEZ TORRES

C.C 1727022772

DIEGO JAVIER PAREDES VALLEJOS

C.C 1002963492



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGIA Y MECANICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

DEDICATORIA

A mis padres por todo su amor y sacrificio para ser el pilar fundamental en el transcurso de mi formación profesional como de vida.

A mi hermana que siempre me apoyó para seguir adelante en todo momento.

A mis abuelos que fueron la fuente de motivación cada día para lograr una las metas más anheladas.

Diego Paredes



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGIA Y MECANICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

DEDICATORIA

A mis padres por todo el apoyo que siempre me brindaron para cumplir con mis metas.

Kevin Gómez



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGIA Y MECANICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AGRADECIMIENTO

A mis padres por ser el pilar fundamental en el transcurso de mi formación profesional y de vida.

A mi hermana que siempre me motivo a seguir adelante en los buenos y malos momentos.

A mis profesores que brindaron su conocimiento durante toda la carrera para dejar siempre en alto el nombre de la querida institución.

Diego Paredes



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGIA Y MECANICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AGRADECIMIENTO

A mis padres por todo el apoyo que siempre me brindaron para cumplir con mis metas.

Kevin Gómez

INDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA	IV
DEDICATORIA	V
AGRADECIMIENTO	VI
AGRADECIMIENTO	VII
RESUMEN.....	XV
PALABRAS CLAVE:.....	XV
ABSTRACT	XVI
CAPITULO 1.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	1
1.2. ÁREA DE INFLUENCIA	2
1.3. REQUERIMIENTOS.....	2
1.4. OBJETIVOS.....	4
1.4.1. OBJETIVO GENERAL.....	4
1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
1.5. ALCANCE DEL PROYECTO.....	4
1.6. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	5
CAPITULO 2.....	7
2. ESTADO DEL ARTE.....	7
2.1. REOLOGÍA DEL HORMIGÓN.....	7
2.1.1. DEFINICIÓN.....	7
2.2. HORMIGÓN.....	7
2.3. HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE.....	8
2.3.1. DEFINICIÓN.....	8
2.3.2. DOSIFICACIÓN	8
2.4. REOMETRÍA	9
2.5. REÓMETROS.....	14
2.5.1. DEFINICIÓN.....	14
2.5.2. FUNCIONAMIENTO	15
2.5.3. REQUISITOS GEOMÉTRICOS DE REÓMETROS	16
2.5.4. COMPORTAMIENTO DE LA RELACIÓN TORQUE – VELOCIDAD ANGULAR	16
2.5.5. REÓMETRO ROTACIONAL PARA HORMIGÓN	18

2.5.6.	REÓMETRO ICAR PLUS	19
2.6.	ESPECIFICACIONES REÓMETRO ICAR PLUS	21
2.7.	SISTEMA DE AGITACIÓN DE PALETAS PLANAS	22
2.8.	POTENCIA DE UN AGITADOR DE PALETAS PLANAS	24
CAPITULO 3.....		26
3.	DISEÑO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES MECÁNICOS Y ELECTRÓNICOS	26
3.1.	DISEÑO DEL SISTEMA BASADO EN MATRIZ DE CALIDAD	26
3.1.1.	NECESIDADES DEL SISTEMA	27
3.1.2.	DEFINICIÓN DE CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	27
3.1.3.	MATRIZ DE LA CALIDAD	28
3.2.	SELECCIÓN DEL MOTOR.....	30
3.2.1.	DENSIDAD DE LA MEZCLA	30
3.2.2.	TAMAÑO DEL RECIPIENTE.....	31
3.2.3.	VOLUMEN DE LA MEZCLA	31
3.2.4.	CAPACIDAD DEL RECIPIENTE.....	31
3.2.5.	DIMENSIONES DEL AGITADOR	32
3.2.6.	VISCOSIDAD DE LA MEZCLA.....	32
3.2.7.	NÚMERO DE REYNOLDS DE LA MEZCLA	33
3.2.8.	NÚMERO DE POTENCIA.....	34
3.2.9.	POTENCIA REQUERIDA POR EL MOTOR	34
3.2.10.	TORQUE REQUERIDO.....	35
3.2.11.	TABLA DE SELECCIÓN DEL MOTOR	36
3.3.	SELECCIÓN DEL CAJA REDUCTORA	37
3.3.1.	CÁLCULO DE LA RELACIÓN DE REDUCCIÓN.....	38
3.3.2.	CÁLCULO DE FACTOR DE SERVICIO	38
3.3.3.	MOMENTO TORSOR DEL REDUCTOR.....	39
3.3.4.	SELECCIÓN DE LA CAJA REDUCTORA.....	39
3.4.	SELECCIÓN DEL VARIADOR DE FRECUENCIA	40
3.4.1.	TABLA DE ESPECIFICACIONES NECESARIAS	41
3.4.2.	TABLA DE SELECCIÓN DEL VARIADOR DE FRECUENCIA	41
3.5.	SELECCIÓN DEL CONTROLADOR	42
3.5.1.	TABLA DE SELECCIÓN DEL CONTROLADOR	42
3.6.	SELECCIÓN DEL ENCODER	44
3.6.1.	TABLA DE SELECCIÓN DE ENCODER	44
3.7.	DISEÑO DEL TABLERO ELÉCTRICO	46
3.8.	DISEÑO DE LA ESTRUCTURA MECÁNICA	46
3.8.1.	ESQUEMA DE LA ESTRUCTURA.....	46
3.8.2.	SELECCIÓN DE DISEÑO PARA LA ESTRUCTURA.....	47
3.8.3.	SELECCIÓN DEL MATERIAL PARA LA ESTRUCTURA.....	48
3.8.4.	SELECCIÓN DEL MATERIAL PARA EL RECIPIENTE	48

3.8.5	SELECCIÓN DEL MATERIAL PARA EL VANO	49
CAPITULO 4.....		51
4. IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS.....		51
4.1.	MONTAJE DE LOS DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS	51
4.2.	CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA DE SOPORTE	53
4.3.	CONSTRUCCIÓN DEL RECIPIENTE METÁLICO.....	55
4.4.	CONSTRUCCIÓN DEL ACOPLE PARA EL ENCODER	56
4.5.	MONTAJE FINAL DE LA ESTRUCTURA.....	56
4.6.	PROGRAMACIÓN Y COMUNICACIÓN	58
4.7.	HMI.....	60
4.8.	PRUEBAS MECÁNICAS.....	66
4.8.1.	PRUEBAS EN VACÍO	66
4.8.2.	PRUEBAS DE REPETIBILIDAD	67
4.8.3.	PRUEBAS DE REPRODUCIBILIDAD.....	70
4.8.4.	ESTUDIO DE CONFIABILIDAD	71
4.8.5.	PRUEBAS CON AGUA	82
4.8.6.	PRUEBAS CON HORMIGÓN	84
CAPITULO 5.....		88
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS		88
5.1.	CONCLUSIONES.....	88
5.2.	RECOMENDACIONES	90
5.3.	TRABAJOS FUTUROS.....	91
BIBLIOGRAFÍA		92
ANEXOS:.....		94

INDICE DE TABLAS

Tabla 1	Características reómetro ICAR PLUS.....	3
Tabla 2	Dosificación de Hormigón Autocompactante	8
Tabla 3	Especificaciones reómetro ICAR PLUS	21
Tabla 4	Necesidades o requerimientos del sistema	27
Tabla 5	Características técnicas o métricas del sistema	27
Tabla 6	Símbolos para matriz QFD.....	28
Tabla 7	Importancia relativa matriz QFD	29
Tabla 8	Matriz de comparación tipos de motores	36
Tabla 9	Matriz de comparación motores trifásicos AC.....	36
Tabla 10	Características caja reductora.....	40
Tabla 11	Parámetros selección variador de frecuencia	41
Tabla 12	Matriz de comparación variadores de frecuencia.....	41
Tabla 13	Matriz de priorización Variadores de frecuencia	42
Tabla 14	Matriz de comparación tipos de controladores	42
Tabla 15	Matriz de priorización controladores	43
Tabla 16	Matriz de comparación tipos de encoder.....	45
Tabla 17	Matriz de priorización encoders	45
Tabla 18	Listado de elementos eléctricos.....	46
Tabla 19	Selección del diseño	47
Tabla 20	Selección del material de la estructura.....	48
Tabla 21	Selección de material del recipiente.....	49
Tabla 22	Selección de material del vano.....	49
Tabla 23	Pruebas en vacío.....	67
Tabla 24	Pruebas R y R.....	67
Tabla 25	Cálculo de rangos	68
Tabla 26	Cálculo del promedio de los rangos	68
Tabla 27	Valores de K1 y K2.....	69
Tabla 28	Pruebas con diferentes concentraciones.....	72
Tabla 29	Prueba 1 con el reómetro Construido.....	72
Tabla 30	Cálculo de esfuerzo cortante y velocidad de corte.....	73
Tabla 31	Prueba 1 con el reómetro del Laboratorio de Reología.....	73
Tabla 32	Prueba 1 Cálculo del error.....	74
Tabla 33	Prueba 2 con el reómetro Construido.....	75

Tabla 34	Cálculo de esfuerzo cortante y velocidad de corte	76
Tabla 35	Prueba 2 con el reómetro del Laboratorio de Reología.....	76
Tabla 36	Prueba 2 Cálculo del error.....	77
Tabla 37	Prueba 3 con el reómetro Construido	78
Tabla 38	Cálculo de esfuerzo cortante y velocidad de corte	79
Tabla 39	Prueba 3 con el reómetro del Laboratorio de Reología.....	79
Tabla 40	Prueba 3 Cálculo del error.....	80
Tabla 41	Error promedio del equipo diseñado	81
Tabla 42	Recolección de datos	82
Tabla 43	Conversión de unidades de velocidad	82
Tabla 44	Cálculo esfuerzo cortante - velocidad de corte	83
Tabla 45	Cálculo viscosidad del agua	84
Tabla 46	Composición mezcla de hormigón 1:2:2.....	84
Tabla 47	Prueba hormigón 1:2:2	85
Tabla 48	Conversión de unidades de velocidad	85
Tabla 49	Cálculo esfuerzo cortante y velocidad de corte.....	85
Tabla 50	Cálculo de viscosidad.....	87

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de construcción reómetro	3
Figura 2. Dosificación de Hormigón Autocompactante	9
Figura 3. Cilindros Coaxiales.....	10
Figura 4. Sistemas de doble gap.....	11
Figura 5. Geometría de paletas.....	11
Figura 6. Geometría Couette	13
Figura 7. Reómetros	15
Figura 8. Posible campo de velocidad de corte cerca de la pared superior del reómetro.	17
Figura 9. Esquema reómetro de paletas rotatorias.	19
Figura 10. Reómetro ICAR PLUS	20
Figura 11. Tasa de tensión de corte.....	20
Figura 12. Equipo ICAR PLUS	22
Figura 13. Configuración estándar de un tanque	23
Figura 14. Matriz QFD.....	29
Figura 15. Dimensiones recipiente.....	31
Figura 16. Evolución de la viscosidad con el tiempo.....	33
Figura 17 Número de potencia – Reynolds.....	34
Figura 18. Caja de Reducción	37
Figura 19. Factores de servicio caja reductora.....	39
Figura 20. Arduino UNO	44
Figura 21. Esquema del reómetro a) Diseño inicial b) Diseño final.....	47
Figura 22. Sujeción rieles y canaletas al panel	51
Figura 23. Cableado y montaje de elementos electrónicos	52
Figura 24. Etiquetado en el cableado	52
Figura 25. Montaje gabinete metálico.....	53
Figura 26. Soldadura marcos de la estructura	53
Figura 27. Armado del marco de la estructura.....	54
Figura 28. Soportes para el motor y caja reductora	54
Figura 29. Base del recipiente.....	55
Figura 30. Montaje y pruebas del recipiente metálico	55
Figura 31. Acoples Encoder a) Acople para sujeción del encoder con la caja reductora	56
Figura 32. Montaje del gabinete a la estructura	57
Figura 33. Pruebas de funcionamiento en vacío	57

Figura 34. Esquema de Comunicación Control Encendido/Apagado Motor.....	58
Figura 35. Diagrama de flujo Motor AC.....	58
Figura 36. Esquema de Comunicación Control Frecuencia/Torque Motor	59
Figura 37. Diagrama de flujo Set Point.....	59
Figura 38. Esquema de Comunicación Lectura rpm.....	59
Figura 39. Diagrama de flujo lectura rpm.....	60
Figura 40. Pantalla de presentación HMI.....	60
Figura 41. Pantalla configuración de la geometría.....	61
Figura 42. Pantalla configuración Inicial	62
Figura 43. Pantalla de pruebas	63
Figura 44. Almacenamiento de datos.....	64
Figura 45. Tratamiento de información	65
Figura 46. Pantalla de ayuda	66
Figura 47. Valor de constantes K1 y K2	69
Figura 48. Gráfica de comparación entre los dos reómetros.....	75
Figura 49. Gráfica de comparación entre los dos reómetros.....	78
Figura 50. Gráfica de comparación entre los dos reómetros.....	81
Figura 51. Gráfica Esfuerzo cortante - Velocidad de corte, Agua	83
Figura 52. Gráfica Esfuerzo cortante - Velocidad de corte hormigón	86

RESUMEN

En el presente proyecto se muestra el diseño y la construcción de un reómetro para medir las propiedades reológicas fundamentales del hormigón autocompactante en estado fresco. Los componentes principales del proyecto es la estructura, el mecanismo de transmisión de movimiento hasta el vano y el sistema de comunicación de datos al computador.

La estructura tiene varias partes como: el bastidor principal encargado de soportar todo el peso de los componentes, la estructura inferior encargada de soportar el peso del recipiente con la mezcla y la estructura superior que brinda movilidad en conjunto con el motor para desmontar el vano y poder sacar el recipiente con mayor facilidad.

El mecanismo de transmisión de movimiento está compuesto principalmente por el motor quien genera el movimiento inicial, pasando por la caja de reducción que amplifica el torque y reduce la velocidad, para finalmente brindar el movimiento ~~de~~ al vano quien está en contacto directo con la mezcla. Para la sujeción del vano se usó un mandril de taladro que da estabilidad y concentricidad al eje. El sistema de comunicación encargado de tomar los datos de interés por medio de los sensores para ser procesados mediante el computador y mostrar los valores que se requieren al finalizar el ensayo.

PALABRAS CLAVE:

- **AUTOCOMPACTANTE**
- **VANO**
- **BASTIDOR**

ABSTRACT

This project shows the design and construction of a rheometer to measure the fundamental rheological properties of self-compacting concrete in the fresh state. The main components of the project are the structure, the mechanism of transmission of movement until the opening and the system of communication of data to the computer.

The structure has several parts such as: the main frame responsible for supporting the entire weight of the components, the lower structure responsible for supporting the weight of the container with the mixture and the upper structure that provides mobility in conjunction with the engine to disassemble the opening and be able to remove the container more easily.

The movement transmission mechanism is mainly composed of the engine that generates the initial movement, passing through the reduction box that amplifies the torque and reduces the speed, to finally provide the movement of the vain who is in direct contact with the mixture. For the clamping of the opening, a drill chuck was used that gives stability and concentricity to the shaft. The communication system responsible for taking the data of interest through the sensors to be processed by the computer and display the values required at the end of the test.

KEYWORDS:

- **SELF-COMPACTING**
- **SUMMER**
- **FRAME**

CAPITULO 1

En el capítulo a continuación se presenta los parámetros tanto de hardware como software que serán tomados en cuenta al momento de construir el equipo, ya que cada una de las partes y componentes están referenciados por un reómetro fabricado por una empresa destacada en el mercado. De esta manera podemos iniciar con mayor eficiencia el proceso de selección y elaboración del equipo para lograr obtener los mejores resultados al momento de usarlo.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

El propósito de la investigación es identificar un método de prueba de campo efectivo para medir la viscosidad del hormigón en general. La viabilidad del hormigón fresco se ha medido tradicionalmente con la prueba de caída, que proporciona una indicación de medida inadecuada. Para ciertas mezclas de hormigón, como las que contienen refuerzo de fibra, escoria granulada de alto horno o alto contenido de agregados la prueba de asentamiento puede proporcionar resultados inexactos y engañosos. Existe la necesidad de un mejor método de prueba para la medida de las variables necesarias para proporcionar dentro de la industria del hormigón.

Basado en una búsqueda bibliográfica en la que se identificaron diferentes métodos de prueba de viabilidad existentes en la industria, los criterios para un dispositivo de prueba de trabajabilidad mejorado fueron desarrollados. Se determinó que el mejor enfoque para la medición de la

viabilidad sería desarrollar un prototipo de reómetro de primera generación, capaz de medir una curva de flujo estacionario o realizar una prueba de crecimiento de estrés y es apropiado para casi la totalidad del rango de medida del hormigón.

1.2. ÁREA DE INFLUENCIA

El área de influencia directa del proyecto es el laboratorio de Reología de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, herramienta para el estudio de propiedades autocompactantes en hormigones.

El área de influencia indirecta del proyecto son empresas que necesiten realizar el estudio de sus productos autocompactantes en hormigón.

1.3. REQUERIMIENTOS

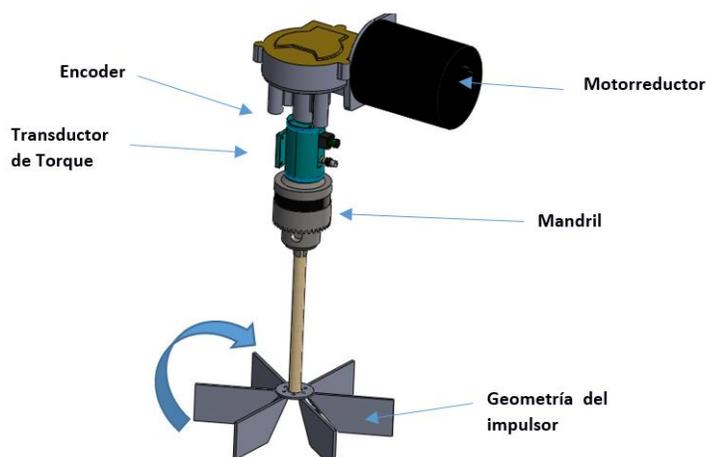
Los requerimientos iniciales fueron el diseño y construcción de reómetro portátil y robusto para medir las propiedades fundamentales del flujo reológico de autocompactantes en hormigón, está compuesto por un contenedor para el hormigón fresco, un cabezal impulsor acoplado al motor eléctrico, sensor de torque, una paleta de cuatro palas sujeta por el mandril. El dispositivo debe presentar información de la velocidad de rotación de la paleta y el par promedio, para su posterior procesamiento de datos.

Se hizo un análisis para basarse en las características del reómetro para hormigón comercial ICAR PLUS, el cual tiene las siguientes especificaciones técnicas:

Tabla 1*Características reómetro ICAR PLUS*

Par mínimo	0.01 Nm
Par máximo	90 Nm
Par máximo continuo	32 Nm
Velocidad de rotación de la paleta	0.001 a 0.667 rev / s
Dimensiones del motor	11 x 11 x 43 cm
Peso de la consola del motor	7.5 Kg
Peso del equipo	20 Kg
Interfaz Gráfica	Si

El reómetro constará de distintas partes como se muestra en la figura, una estación de potencia, una de control y adquisición de datos para ser mostrados en la HMI por medio del computador. En la tabla se enumeran las diferentes partes del sistema.

**Figura 1.** Esquema de construcción reómetro

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un equipo que permita evaluar los cambios reológicos (cizalla continua) en hormigones convencionales con adiciones de aditivos auto-compactantes.

1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener el dimensionamiento adecuado tanto para el motor como para los sensores.
- Diseñar la estructura del equipo bajo las condiciones definidas.
- Definir los materiales adecuados para la construcción de la estructura del equipo.
- Realizar una interfaz gráfica para facilitar la muestra del comportamiento de las variables medidas.
- Integrar un sistema de control para la cizalla continua y oscilatoria.

1.5. ALCANCE DEL PROYECTO

El equipo contará con un sistema de adquisición de datos que permita visualizar en tiempo real, almacenar y exportar las medidas obtenidas para posteriormente ser analizadas en un software externo. Las mediciones tendrán que ser tratadas previamente para evitar que agentes ajenos a la naturaleza de la medición reológica distorsionen dichos resultados, tales como vibraciones, inercia del equipo, inercia de los elementos, etc.

El software, además, deberá permitir transformar las variables medidas en otras de mayor uso en la industria tales como esfuerzo de cizalla, velocidad de cizalla, módulo de almacenamiento (G'), módulo de dispersión (G''), viscosidad compleja, etc., según corresponda el caso.

Los datos serán presentados en una interfaz intuitiva y robusta en un computador donde se podrá obtener toda la información descrita previamente. Esta versatilidad permitirá al usuario realizar medidas en campo y poder hacer uso del computador que disponga en ese momento.

No obstante, el margen de computadores/laptops estarán definidos por unos requisitos mínimos para que sea compatible el software y el equipo en mención.

1.6. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

El documento está compuesto por cinco capítulos: El Capítulo I es una descripción básica del proyecto en se presenta la justificación e importancia, estudios e investigaciones desarrollados en el ámbito nacional como internacional acerca del tema planteado, también se presentan los objetivos y una descripción del alcance.

El Capítulo 2 es una fundamentación teórica acerca de los temas de mayor importancia que se encuentran ligados con el proyecto como son: Reología del hormigón, hormigón autocompactante, tipos de reómetros y lo relacionado con la agitación de paletas planas (vanos).

El Capítulo 3 expone el diseño y selección de los componentes mecánicos y eléctricos del reómetro entre los más importantes se encuentra la estructura, el mecanismo de transmisión de movimiento, los componentes eléctricos con el sistema de comunicación de datos, y la integración de los mismos para su correcto funcionamiento.

El Capítulo 4 describe las pruebas realizadas de funcionamiento tanto mecánicas como electrónicas y los resultados obtenidos, con el fin de lograr medir las variables requeridas durante el ensayo reológico del hormigón.

El Capítulo 5 presenta las conclusiones obtenidas una vez terminada la construcción del reómetro y las recomendaciones para sus respectivos trabajos o estudios a futuro.

CAPITULO 2

El capítulo a continuación contiene información detallada sobre temas de interés dentro de la reología y los distintos tipos de reómetros con sus características principales, de esta manera es importante que podamos comprender con exactitud cada factor necesario ya que al momento de tomar decisiones de construcción o de programación para el equipo se lo debe hacer con el cuidado y seguridad del caso.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Reología del hormigón

2.1.1. Definición

La reología abarca el estudio de la deformación y flujo de la materia. Muchos materiales, sean naturales o fabricados por el hombre, presentan comportamientos de flujo inusuales, también son llamados no newtonianos.

La reología es la ciencia del flujo y deformación de la materia del hormigón, la medición de las propiedades reológicas del hormigón es importantes para la industria de la construcción dado que el hormigón es emplazado en su estado fluido. Desafortunadamente dado la compleja composición de materiales del hormigón, este no permite establecer un método exacto para predecir su flujo. (Ramírez-Navas, 2006)

2.2. Hormigón

El hormigón es una mezcla íntima y homogénea de áridos finos, áridos gruesos, un aglomerante y agua en las debidas proporciones para que endurezca. En el momento de su mezclado puede añadirse otros productos o materiales para mejorar alguna de sus características determinadas. (Fernández Canovas, 1989)

2.3. Hormigón Autocompactante

2.3.1. Definición

El hormigón autocompactante es capaz de compactarse por simple acción de la gravedad de esta manera podemos definir la autocompactabilidad como la propiedad que presentan algunos hormigones de consistencia fluida y poco viscosa de compactarse sin necesidad de aportación de energía (vibración), rellenando los encofrados y discurriendo entre las armaduras sin que se produzca sangrado de la lechada ni bloqueo del árido grueso. (Burón Maestro, 2006)

2.3.2. Dosificación

Tabla 2

Dosificación de Hormigón Autocompactante

Elevado volumen de pasta (cemento, adiciones, y agua)	35%-40%
Bajo volumen de árido grueso	25%-35%
Reducido tamaño máximo del árido grueso	< 20mm
Baja relación agua/finos	< 0.4
Empleo de superfluidificantes y agentes modificadores de la viscosidad	

Fuente: (Fernández Gómez, 2019)

Para una mejor interpretación de la Tabla 2 podemos observar gráficamente la composición del hormigón autocompactante que se muestra en la Figura 2.

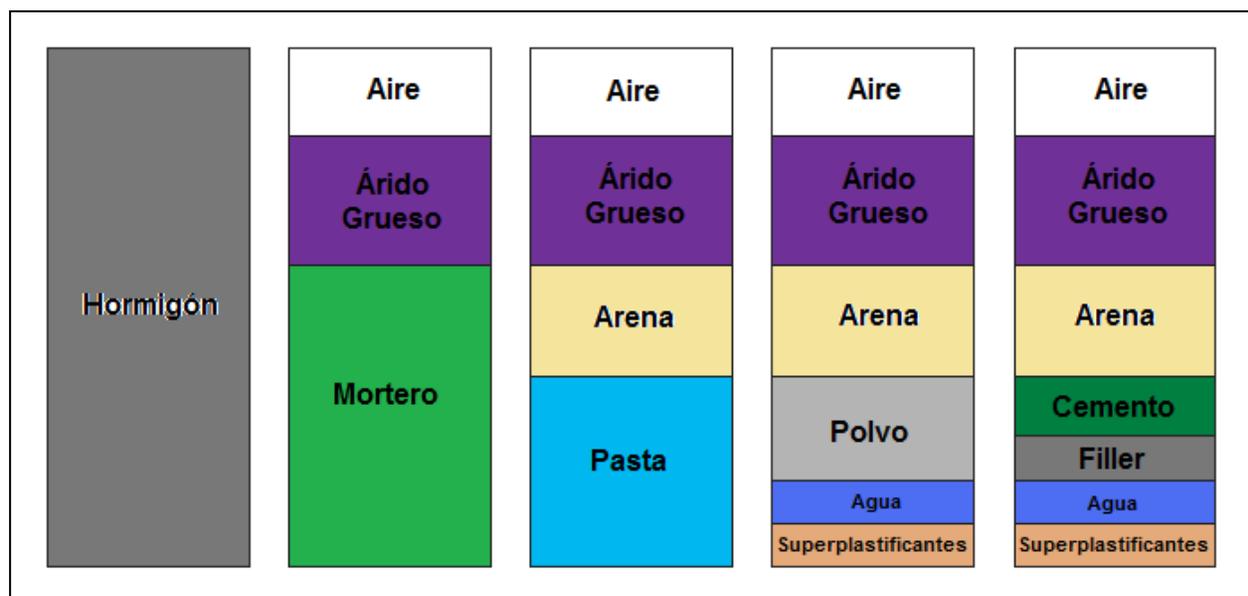


Figura 2. Dosificación de Hormigón Autocompactante

Fuente: (Fernández Gómez, 2019)

2.4. Reometría

Reometría es una técnica experimental que sirve para determinar las propiedades reológicas de los materiales y se define como el estudio de la deformación y flujo de la materia y permite describir la interrelación entre fuerza, deformación y tiempo. (Panalytical, 2020)

Para realizar las mediciones de las propiedades reológicas posibles, existe una amplia gama de formas llamadas geometrías, estas dependen en gran medida de los fluidos a los cuales se realizarán las pruebas tales como los sistemas de cilindros coaxiales que se muestran en la Figura

3. son muy comunes para pruebas de líquidos de baja viscosidad, pero en general son adecuadas para líquidos viscosos hasta líquidos visco elásticos



Figura 3. Cilindros Coaxiales

Fuente: (GmbH, 2020)

Los sistemas de doble gap tienen una geometría especial que permite una gran área de contacto entre la muestra y la superficie de la geometría permitiendo obtener alta resolución de torque, obteniendo como ventaja la gran superficie, buena estabilidad térmica y pocas turbulencias como se muestra en la Figura 4.



Figura 4. Sistemas de doble gap

Fuente: (GmbH, 2020)

Las geometrías de paletas son adecuadas para medir muestras que contienen partículas mayores a 0.1mm y con tendencia a sedimentarse, diseñadas especialmente para las industrias de pintura, construcción y minería como se ve en la Figura 5. (GmbH, 2020)



Figura 5. Geometría de paletas

Fuente: (GmbH, 2020)

En una geometría como la que usamos en el proyecto, el material se coloca entre dos cilindros coaxiales. En la mayoría de los casos, el cilindro externo se fija y se corta el cizallamiento al girar el cilindro interno de altura H alrededor del eje de simetría a una velocidad Ω , lo que resulta en un par T. Nota que la distancia del cilindro interno al fondo del recipiente generalmente se elige para ser mucho más grande que el tamaño del espacio para garantizar que la contribución al par de la cizalladura en la parte inferior sea lo más insignificante posible, estos efectos finales pueden corregirse con procedimientos apropiados si es necesario (Macosko, 1994) .

Las ecuaciones estándar utilizadas para relacionar los datos de par / velocidad de rotación T (Ω) a un punto de datos de comportamiento constitutivo τ ($\dot{\gamma}$) son finalmente, cuando se calcula en el medio de la brecha o llamado Gap. (Roussel, 2012)

Podemos visualizar las variables a usar mediante la Figura 6.

$$\bar{R} = \frac{R_o - R_i}{2}$$

R_o : radio del recipiente [m]

R_i : radio del vano [m]

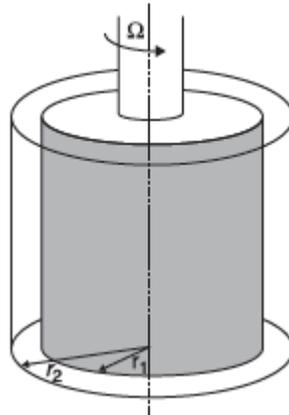


Figura 6. Geometría Couette
Fuente: (Coussot, 2005)

$$r_1: R_o$$

$$r_2: R_i$$

La velocidad de corte se obtiene por medio de la fórmula:

$$\dot{\gamma} = \Omega \frac{R_i}{R_o - R_i}$$

Ω : velocidad angular [rpm]

El esfuerzo cortante se obtiene por medio de:

$$\dot{\gamma} = \frac{T}{2 * \pi * h * R_i}$$

T: torque [Nm]

h: distancia entre el fondo del recipiente y el vano [m]

2.5. Reómetros

El reómetro es un instrumento de laboratorio empleado para medir el esfuerzo y la viscosidad con la que un líquido fluye, o algún tipo de mezcla, exponiéndola a una determinada fuerza. Su estructura mecánica permite determinar el fluido de aquellas sustancias líquidas que no tienen definido un único valor de viscosidad. (Ramírez-Navas, 2006)

El vano es un componente con forma de hélice fija a un eje y sin ningún contacto con el recipiente, que gira en forma circular. Puede ser de distintos tipos según el servicio para el que esté proyectado ya que dependiendo de su geometría varía el comportamiento de los datos de flujo reológico. (Mataix, 2006)

2.5.1. Definición

Un reómetro mide siempre las mismas magnitudes de medidas, tales como el ángulo de giro, el par y el periodo. Con un reómetro se puede determinar y analizar el comportamiento de materiales en deformación y fluidez. Los parámetros reológicos como viscosidad, fluencia, tasa de cizallamiento, tensión tangencial y la deformación se pueden determinar sólo con factores específicos del sistema de medición. Varios sistemas de medición del reómetro aseguran la conversión exacta en las magnitudes reológicas.

Para muchos productos es esencial saber dónde se encuentra el límite de fluencia, este valor tan importante sirve para fabricar los productos con la misma calidad, tales como geles, barnices,

pinturas, lubricantes, pastas o pomadas. En la industria alimentaria se pueden mantener las propiedades típicas del producto sólo porque se conoce su comportamiento de fluencia, tal como sucede con cremas de nata, flanes o postres. En la medicina porta la sangre con sus propiedades de fluencia una función muy importante para el suministro de nutrientes y oxígeno a todos los órganos. En la transformación de plásticos sirve la denominada reología para medir el punto de fusión y fluencia. Figura 7 (Rheological, 2019)



Figura 7. Reómetros

Fuente: (Malvern Panalytical reologics, 2019)

2.5.2. Funcionamiento

Un reómetro mide y analiza los cambios en la estructura reológica de un material, la forma de flujo de los fluidos. Esto se logra mediante la variación de las tasas de corte en cizalla continua y oscilante. Este instrumento puede analizar el límite elástico del material y el comportamiento del flujo de medición, la respuesta al estrés en comparación con la tensión durante las pruebas de velocidad constante y los cambios de viscosidad como una función de cambio de velocidad de

corte. Se revisará específicamente los reómetros de tipo rotacional para hormigón. (Miniparc, 2018)

2.5.3. Requisitos Geométricos de Reómetros

La regla general para los reómetros de hormigón es que el tamaño del espacio entre la geometría y el recipiente debe estar en un rango de 3 a 10 veces el tamaño máximo del posible sólido en suspensión. Esto es de suma importancia ya que se debe minimizar el efecto del cambio en el empaque de partículas cerca de las paredes.

La relación de los diámetros exterior a interior se ha sugerido como 1.2 o 1.1 para asegurar una pequeña variación en la velocidad de corte a través del espacio y para minimizar el rango de velocidad a la que se produce el flujo. El valor recomendado entre la altura y el radio del reómetro de cilindro coaxial es menor que 1.0 para minimizar la contribución del fondo del cilindro. (Laskar & Bhattacharjee, 2011)

2.5.4. Comportamiento de la relación torque – velocidad angular

En el reómetro de paletas ya existente en el mercado ICAR, tiene una disposición para el deslizamiento que se proporciona en la parte superior de la muestra de hormigón, por lo tanto, la superficie superior del hormigón a veces puede rotar durante cizallamiento (deslizamiento parcial). También es probable que la velocidad de material en la parte superior es exactamente cero

(antideslizante) dependiendo de la velocidad de corte para una geometría dada del reómetro.

(Laskar & Bhattacharjee, 2011)

La otra posibilidad es que la velocidad sea cero a alguna profundidad medida desde la parte superior, particularmente cuando la velocidad angular es pequeña como en los perfiles de velocidad se muestran en la Figura 8.

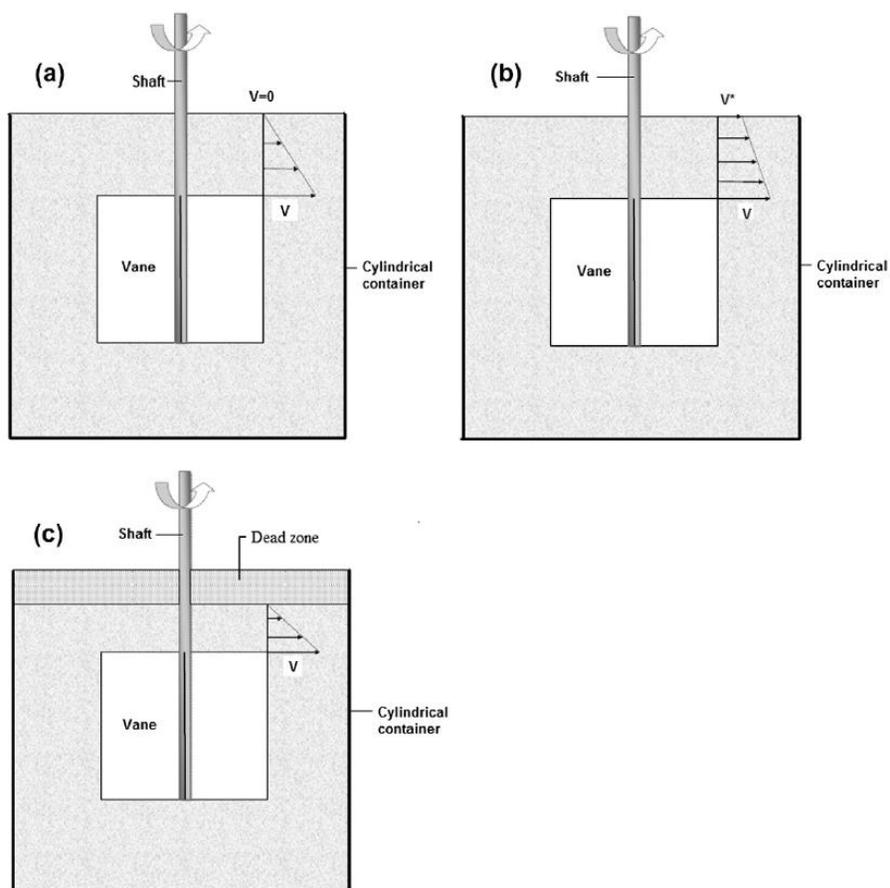


Figura 8. Posible campo de velocidad de corte cerca de la pared superior del reómetro.

Fuente: (Laskar & Bhattacharjee, 2011)

2.5.5. Reómetro rotacional para hormigón

Los reómetros rotacionales son probablemente las herramientas reológicas disponibles más versátiles y se pueden configurar para diferentes métodos reológicos, para sondear la estructura y el rendimiento de las suspensiones. Los tipos de pruebas van desde la generación de curvas de flujo de viscosidad simples hasta aplicaciones donde es necesario un alto par. Existen varias distribuciones geométricas, para el hormigón se utilizan vanos debido a la facilidad de aplicación. (Koehler, 2004)

Este dispositivo revolucionó el campo de medición del flujo de hormigón, introduciendo el concepto que permite caracterizar realmente respuesta en estado fresco. el cual se comporta como un material no newtoniano, desde entonces se han desarrollado y comercializado otros dos reómetros, IBB18 e ICAR 19. Figura 9 (Rojas, 2019)

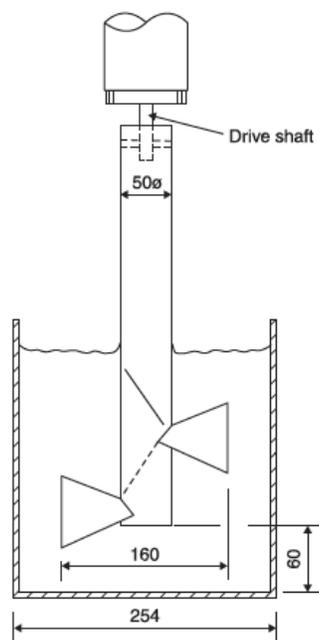


Figura 9. Esquema reómetro de paletas rotatorias.

Fuente: (Rojas, 2019)

2.5.6. Reómetro ICAR Plus

El reómetro ICAR Plus es un instrumento robusto y portátil para medir las propiedades reológicas del hormigón fresco. Se utiliza para satisfacer la necesidad de un método para caracterizar el verdadero comportamiento de flujo de las mezclas de hormigón. Los métodos tradicionales para medir la caída del flujo ya que no son capaces de caracterizar las propiedades reológicas fundamentales del hormigón que existen durante los procesos de mezcla, transporte y colocación. Figura 10 (Instruments, 2019)



Figura 10. Reómetro ICAR PLUS

Fuente: (Instruments, 2019)

El reómetro ICAR Plus está diseñado para caracterizar la tensión de rendimiento estática, la tensión de rendimiento dinámico y la viscosidad plástica del hormigón. Un alto esfuerzo de rendimiento estático es deseable porque reduce la presión de encofrado y aumenta la resistencia a la segregación. Figura 11. (Daczko, 2012)

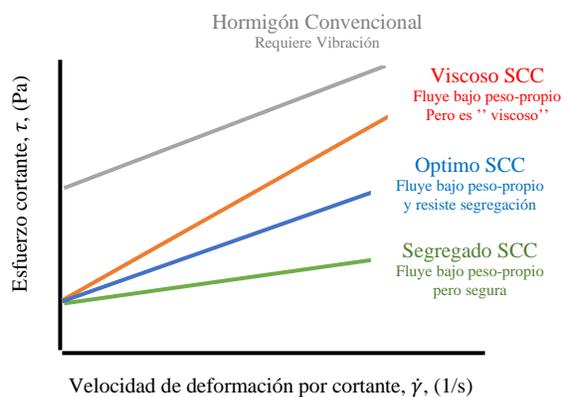


Figura 11. Tasa de tensión de corte.

Fuente: (Daczko, 2012)

Para facilitar el bombeo, la colocación y la auto consolidación, es necesario un bajo esfuerzo de rendimiento dinámico. La viscosidad dinámica proporciona cohesión y contribuye a reducir la segregación cuando fluye el hormigón. El hormigón convencional tiene un alto rendimiento dinámico y se necesita energía adicional (vibración) para consolidar el hormigón después de que se coloca en formas. Todas las mezclas auto lubricantes tienen un bajo estrés de rendimiento dinámico y se consolidarán debido al peso propio, pero tienen diferentes propiedades reológicas.

2.6. Especificaciones reómetro ICAR PLUS

Tabla 3

Especificaciones reómetro ICAR PLUS

Depresión mínima	>75mm
Tamaño máximo del agregado	32mm
Velocidad de rotación de la paleta	0,001 a 0,667 rev / s
Tipo de motor	Servomotor integrado
Par Mínimo	0.01Nm
Torque pico	90Nm por no más de 2 segundos
Torque Máximo Continuo	32 Nm
Fuente de alimentación	100-240 VAC - 3.5A
Salida	48V - 6.7A. IP67
Tiempo de prueba	1 min
Requisitos informáticos	Windows 7 o superior. Procesador I3 o superior
Peso del motor	7.5 kg
Peso de la caja de transporte	20 kg



Figura 12. Equipo ICAR PLUS

Fuente: (Germann.org, 2019)

2.7. Sistema de agitación de paletas planas

Consisten en una hoja plana sujeta a un eje rotatorio, permitiendo al flujo del líquido un componente radial y rotacional grande, de construcción relativamente fácil, son sencillos y producen una acción de mezcla suave a velocidades bajas. Es empleado en líquidos viscosos que pueden generar depósitos en las paredes.

Existen proporciones para sistemas de agitación estándar que serán útiles para el diseño del reómetro como se muestra en la Figura 13.

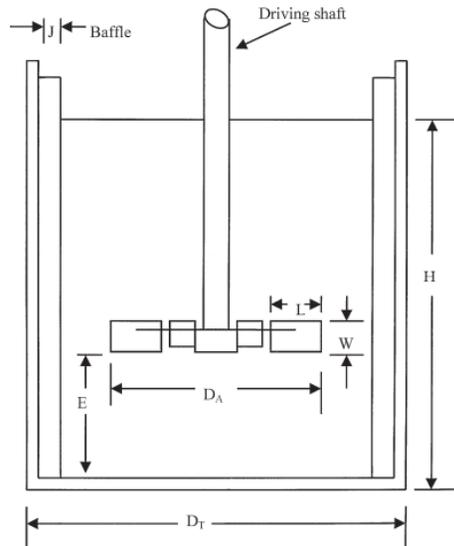


Figura 13. Configuración estándar de un tanque

Fuente: (Coker, 2001)

Donde:

Proporciones geométricas para un sistema estándar de agitación

$$\frac{D_A}{D_T} = \frac{1}{3}$$

$$\frac{E}{D_A} = 1$$

$$\frac{H}{D_T} = 1$$

$$\frac{W}{D_A} = \frac{1}{5}$$

$$\frac{j}{D_T} = \frac{1}{12}$$

$$\frac{L}{D_A} = \frac{1}{4}$$

B: número de palas del impulsor

R: número de deflectores

D_A: diámetro del agitador

H: altura del líquido

D_T: diámetro del tanque

E: altura del agitador desde el fondo del tanque

J: ancho del deflector

L: longitud de la cuchilla del agitador

W: ancho de la cuchilla del agitador (Coker, 2001)

2.8. Potencia de un agitador de paletas planas

Para un proceso eficaz es necesario determinar varios factores como la velocidad de circulación y la turbulencia del fluido, estos parámetros consumen energía y es importante realizar el cálculo correcto de la potencia requerida del dispositivo de agitación. Se puede conocer la potencia consumida por el agitador a través de numero adimensionales, para lo cual se relación el número de Reynolds y el número de potencia, este depende de la geometría del agitador. (Uribe, 2013)

$$Re = \frac{N * D_A^2 * \rho}{\mu}$$

N: velocidad de rotación [rps]

D_A: diametro del agitador [m]

ρ: densidad del fluido [kg/m³]

μ: viscosidad [Pa * s]

$$Np = \frac{P}{N^3 * D_A^2 * \rho}$$

P: potencia de agitación del impulsor [Watts]

N: velocidad de rotación [rps]

D_A: diametro del agitador [m]

ρ: densidad del fluido [kg/m³]

CAPITULO 3

El capítulo a continuación contiene cálculos de diseño e información de suma importancia para realizar un apropiado dimensionamiento de los componentes tanto mecánicos como electrónicos, en cuanto a la selección de la parte electrónica se usó varias alternativas mediante tablas con sus características más importantes para así poder descartar y elegir el más adecuado. Para comprobar que la selección del material de varios componentes mecánicos es necesario usar catálogos certificados para implementar en la construcción del reómetro. Se utilizó la matriz QDF donde se interpretan las necesidades y requerimientos del proyecto, se determinan las características importantes dando prioridad a ciertas características sobre otras.

3. DISEÑO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES MECÁNICOS Y ELECTRÓNICOS

3.1. Diseño del sistema basado en matriz de calidad

EL diseño por medio de la matriz de calidad QFD, es un método utilizado en ingeniería diseñado para valorar las necesidades del cliente en función de métricas o características técnicas solicitadas para un producto. Tabla 4

3.1.1. Necesidades del sistema

Tabla 4

Necesidades o requerimientos del sistema

N°	Requerimientos
1	Resistente
2	Económico
3	Buen diseño
4	Software amigable
5	Diseño seguro
6	Transportable
7	Fácil mantenimiento
8	Alto torque
9	Visualización en tiempo real
10	Manipulación de datos

3.1.2. Definición de características técnicas

Tabla 5

Características técnicas o métricas del sistema

N°	Característica técnica
1	Calidad de los materiales de la estructura
2	Tipo de motor
3	Tipo de controlador
4	Tipo de encoder
5	Tipo de caja reductora
6	Software de simulación
7	Simulaciones estáticas y dinámicas de cargas
8	Diseño en software del sistema eléctrico
9	Interfaz de control HMI
10	Calidad elementos electrónicos
11	Peso

3.1.3. Matriz de la calidad

Una vez se establecen las necesidades y características técnicas del sistema, es necesario elaborar la matriz QFD, donde se determinan ponderaciones con el fin de clasificar y dar prioridad a las características con más importancia. La muestra los símbolos utilizados para la elaboración de la matriz QDF y sus respectivas puntuaciones.

Tabla 6
Símbolos para matriz QFD

Símbolo	Descripción	Peso
	Fuertemente relacionado	9
	Moderadamente relacionado	3
	Pocamente relacionado	1
	Muy relacionado	
	Relacionado	

Row #	Max Relationship Value in Row	Relative Weight	Weight / Importance	Demanded Quality (a.k.a. "Customer Requirements" or "Whats")	Quality Characteristics (a.k.a. "Functional Requirements" or "Hows")	Calidad de los materiales de la estructura	Tipo de motor	Tipos de controladores	Tipos de encoders	Tipo de caja reductora	Software de simulación	Simulaciones estáticas y dinámicas de cargas	Diseño en software del sistema eléctrico	Interfaz de control HMI	Calidad elementos electrónicos	Peso				
1	9	10,1	8,0	Resistente		⊙						⊙				⊙				
2	9	12,7	10,0	Económico		⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	▲	▲	⊙	⊙	⊙				
3	9	10,1	8,0	Buen diseño		⊙	⊙	⊙	⊙	⊙		⊙	⊙	⊙	⊙	⊙				
4	9	10,1	8,0	Software amigable			▲	⊙	⊙		⊙			⊙	▲					
5	9	7,6	6,0	Diseño seguro		⊙	▲					⊙	⊙				▲			
6	9	8,9	7,0	Transportable		⊙	⊙			⊙			▲			⊙				
7	9	8,9	7,0	Facil mantenimiento		⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙		⊙	▲	⊙	⊙				
8	9	11,4	9,0	Alto torque			⊙			⊙										
9	9	7,6	6,0	Visualización en tiempo real				⊙	⊙		⊙			⊙						
10	9	12,7	10,0	Manipulación de datos				⊙	▲		⊙			⊙						
Target or Limit Value																60kg				
Difficulty (0=Easy to Accomplish, 10=Extremely Difficult)						2	6	6	4	2	3	1	1	4	6	6				
Max Relationship Value in Column						9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9			
Weight / Importance						470,9	431,6	505,1	297,5	360,8	467,1	263,3	260,8	350,6	181,0	410,1				
Relative Weight						11,8	10,8	12,6	7,4	9,0	11,7	6,6	6,5	8,8	4,5	10,3				

Figura 14. Matriz QFD

Tabla 7
Importancia relativa matriz QFD

Nº	Característica técnica	Importancia relativa
1	Calidad de los materiales de la estructura	11.8
2	Tipo de motor	10.8
3	Tipo de controlador	12.6
4	Tipo de encoder	7.4
5	Tipo de caja reductora	9.0
6	Software de simulación	11.7
7	Simulaciones estáticas y dinámicas de cargas	6.6
8	Diseño en software del sistema eléctrico	6.5


 continua

9	Interfaz de control HMI	8.8
10	Calidad elementos electrónicos	4.5
11	Peso	10.3

3.2. Selección del Motor

Se calcula la densidad promedio de la mezcla para lo cual nos guiaremos en las densidades de cada uno de los elementos que la componen.

3.2.1. Densidad de la mezcla

$$\rho_{\text{cemento}} = 3150 \text{ Kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{agua}} = 1000 \text{ Kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{arena}} = 2500 \text{ Kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{ripio}} = 2630 \text{ Kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{mezcla}} = \frac{\rho_{\text{cemento}} + \rho_{\text{agua}} + \rho_{\text{arena}} + \rho_{\text{ripio}}}{4} = 2320 \text{ Kg/m}^3$$

Basado en el tamaño del Reómetro ICAR PLUS, se tomaron medidas referenciales. Se calcula la densidad promedio de la mezcla para lo cual nos guiaremos en las densidades de cada uno de los elementos que la componen.

3.2.2. Tamaño del recipiente

Diámetro: 30 cm
Altura: 40 cm
Altura de la mezcla: 35 cm

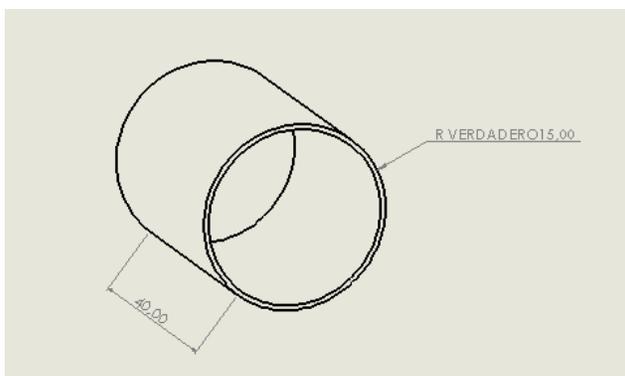


Figura 15. Dimensiones recipiente

3.2.3. Volumen de la mezcla

$$V = \pi * \left(\frac{\text{diámetro}}{2}\right)^2 * \text{Altura}_{\text{mezcla}}$$

$$V = \pi * \left(\frac{30}{2}\right)^2 * 35$$

$$V = 24.74 \text{ L}$$

3.2.4. Capacidad del recipiente

$$\rho_{\text{mezcla}} = \frac{m}{V}$$

$$m = \rho_{\text{mezcla}} * V$$

$$m = 2320 * 24.74$$

$$m = 57.4 \text{ Kg}$$

3.2.5. Dimensiones del agitador

Dado que el diámetro del tanque es: $D_T = 30\text{cm}$, de la figura 8 se obtienen las medidas necesarias para su construcción. Obtenidas como referencia del Reómetro ICAR Plus

$$D_T = 30\text{cm}$$

$$D_A = 15\text{ cm}$$

$$W = 13\text{ cm}$$

$$L = 7\text{ cm}$$

$$E = 15\text{ cm}$$

$$H = 30\text{ cm}$$

3.2.6. Viscosidad de la mezcla

Del estudio de viscosidad del hormigón se obtiene que la viscosidad máxima es aproximadamente:

$$\mu = 27\text{ Pa} \cdot \text{s}$$

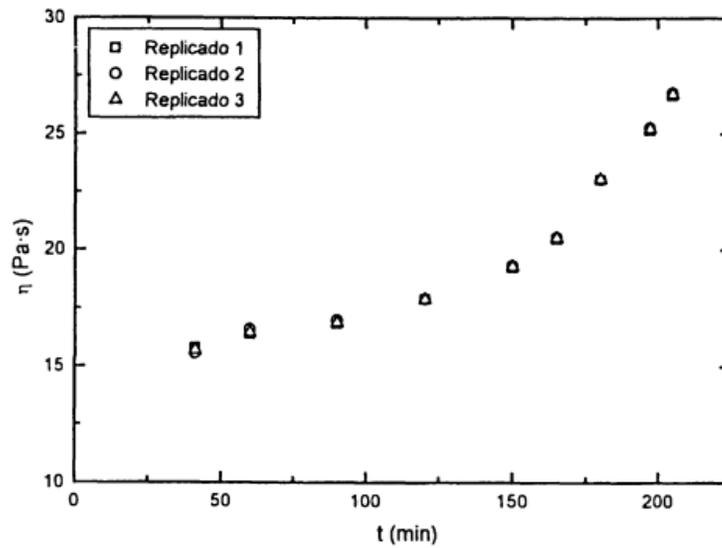


Figura 16. Evolución de la viscosidad con el tiempo
Fuente: (Miranda, 1999)

La Figura 16 muestra la evolución de viscosidad en el tiempo para pastas de cemento relación agua cemento de 0.5, agitación constante 50 rev/min, IKA MR-D1

3.2.7. Número de Reynolds de la mezcla

$$Re = \frac{N * D_A^2 * \rho}{\mu}$$

$$N: 40 [rpm] = 0.667 [rps]$$

$$D_A: 10 [cm] = 0.1[m]$$

$$\rho: 2320 [kg/m^3]$$

$$\mu: 27 [Pa * s]$$

$$Re = \frac{0.667 * 0.1^2 * 2320}{27} = 3.599$$

Comprobamos que $Re < 10$ por lo tanto se trabaja en un régimen laminar.

3.2.8. Número de potencia

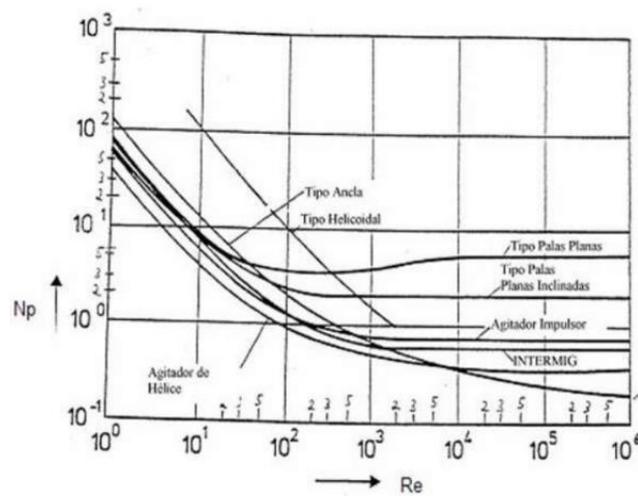


Figura 17 Número de potencia – Reynolds

Fuente: (Miranda, 1999)

De la gráfica para el tipo de palas planas el número de potencia es:

$$Np = 100$$

3.2.9. Potencia requerida por el motor

$$Np = \frac{P}{N^3 * D_A^2 * \rho}$$

$$P = Np * N^3 * D_A^2 * \rho$$

P : potencia de agitación del impulsor [Watts]

N : 40[rpm] = 0.667 [rps]

D_A : 10[cm] = 0.1 [m]

ρ : 2320 [kg/m³]

$$P = 100 * 0.667^3 * 0.1^2 * 2320$$

$$P = 0.229 \text{ Hp}$$

Los motores estándar AC próximo a los cálculos realizados de 0.5 Hp

3.2.10. Torque requerido

$$T = \frac{P * 9549 * n}{N}$$

P : 0.5 [Hp]

$n = 0.7$ (eficiencia de la caja reductora)

N : 40 [rpm]

Se selecciona $N=40$ rpm debido a que esta es la velocidad estimada de trabajo con carga.

$$T = \frac{0.5 * 9549 * 0.7}{40} = 83.55 \text{ Nm}$$

3.2.11. Tabla de selección del Motor

Tabla 8

Matriz de comparación tipos de motores

Requerimientos	Motor DC	Motor AC monofásico	Motor AC trifásico	Servomotor	Motor a pasos
Costo	3	5	4	2	2
Velocidad máxima	5	5	5	5	2
Tamaño	5	5	5	3	4
Accesibilidad	4	5	5	3	4
Versatilidad	5	3	5	3	3
Total	22	23	24	16	15

Tabla 9

Matriz de comparación motores trifásicos AC

Requerimientos	Siemens 56	WEG W22
Potencia (Hp)	0.5	0.5
Velocidad máxima (rpm)	1730	1725
Par nominal (Nm)	2.06	2.06
Peso (Kg)	7.9	9
Corriente nominal (A)	2.1	0.81
Costo (\$)	180	140

En base a los requerimientos para el reómetro el motor WEG W22 es el indicado para el trabajo.

El motor eléctrico es la máquina destinada a transformar energía eléctrica en energía mecánica. El motor de inducción es el más usado de todos los tipos de motores, ya que combina las ventajas de la utilización de energía eléctrica, bajo costo, facilidad de transporte, limpieza,

simplicidad de comando con su construcción simple y su gran versatilidad de adaptación a las cargas de los más diversos tipos y mejores rendimientos. (WEG, 2019)

3.3. Selección del Caja reductora

Toda máquina cuyo movimiento sea generado por un motor necesita que la velocidad se adapte a los requerimientos de la aplicación, así también como la potencia mecánica a transmitir, potencia térmica y rendimientos mecánicos.

Esta adaptación se realiza por medio de un grupo de engranes que adaptan la velocidad de salida y la consiguen mantener en un régimen cercano al ideal, denominado caja reductora.

Los reductores de velocidad sin fin corona como se muestra en la Figura 18 son los más sencillos y se componen de una corona dentada, la cual está en contando constante con un husillo en forma de tornillo sin fin. Una vuelta realizada por el tornillo sin fin provoca el avance de un diente de la corona originando como consecuencia la reducción de la velocidad.



Figura 18. Caja de Reducción
Fuente: (Pardo , 2012)

n_1 : Velocidad angular entrada del reductor [rpm]

n_2 : Velocidad angular a la salida del reductor [rpm]

i : relación de reducción

M_{r2} : Momento de torsión requerido por la aplicación

3.3.1. Cálculo de la relación de reducción

Esta relaciona la velocidad de entrada en el reductor y la velocidad requerida de la aplicación.

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{1725}{40} = 43.13$$

3.3.2. Cálculo de factor de servicio

Este parámetro es función del tipo de carga de la máquina, el número de accionamientos por hora y de la cantidad de horas de funcionamiento.

CARGA:

- **A** – uniforme = $f_a \leq 0.3$
- **B** – sobrecarga media = $f_a \leq 3$
- **C** – sobrecarga fuerte = $f_a \leq 10$

Se selecciona el tipo de carga B, el cual sirve para máquinas de carga media tal como cintas transportadoras, roscadoras, agitadoras y mezcladoras medianas

Duración de funcionamiento diario relaciona horas/día. Esta máquina inicialmente es utilizada para realizar ensayos por lo que tendrá un funcionamiento mínimo, se aproximada 5 horas al día, y 4 arranques por hora.

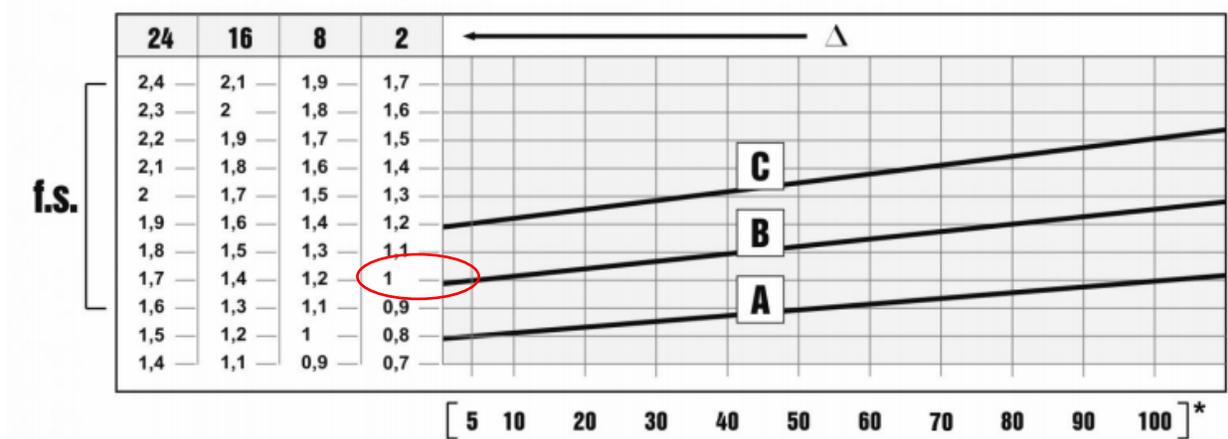


Figura 19. Factores de servicio caja reductora

Según la Figura 19. Se observa que el factor de servicio es de 1.

3.3.3. Momento Torsor del reductor

$$Mc2 = Mr2 * fs$$

$$Mc2 = 61 * 1$$

$$Mc2 = 61 Nm$$

3.3.4. Selección de la caja reductora

Para la selección de la caja de reducción se utilizó la tabla ubicada en anexos. De igual manera para obtener los datos de la Tabla 10 se requiere acudir a la tabla de rendimientos estáticos y dinámicos ubicada en anexos.

Tabla 10

Características caja reductora

Requerimientos	Reductor BW50Q Sin fin corona
Relación de reducción	40:1
Rendimiento dinámico	0.65
Rendimiento estático	0.39
% Eficiencia	75 %
Potencia máxima	0.74 kW
Costo	\$ 95
Velocidad de salida	35 rpm

3.4. Selección del variador de frecuencia

Para la selección del variador de frecuencia es necesario tener en cuenta los siguientes parámetros detallados en la Tabla 11.

Los variadores de velocidad son dispositivos electrónicos que permiten variar la velocidad y el torque de los motores asincrónicos trifásicos, convirtiendo las magnitudes fijas de frecuencia y tensión de red en magnitudes variables. (Piñero, 2015)

3.4.1. Tabla de especificaciones necesarias

Tabla 11

Parámetros selección variador de frecuencia

Requerimientos	
Suministro de voltaje nominal [V]	220 monofásico
Frecuencia de entrada [Hz]	50 – 60
Frecuencia de salida [Hz]	0 – 80
Potencia de salida [hp]	0.5
Corriente de salida [A]	2
Entradas analógicas	1
Entradas digitales	2
Salidas analógicas	2

3.4.2. Tabla de selección del variador de frecuencia

Tabla 12

Matriz de comparación variadores de frecuencia

Requerimientos	Siemens Sinamics V20	PowerFlex 40 22B-A2P3x104	Powtran PI130
Suministro de voltaje [V]	220 monofásico	220 monofásico	220 monofásico
Frecuencia de entrada [Hz]	50 -60	50 - 60	50 - 60
Potencia salida [hp]	0.54	0.5	0.54
Corriente salida [A]	2.3	2.3	2.5
Entradas analógicas	2	0	2
Entradas digitales	4	4	5
Salidas analógicas	1	1	1
Costo	\$ 220	\$207	\$ 145

Tabla 13*Matriz de priorización Variadores de frecuencia*

Requerimientos	Siemens Sinamics V20	PowerFlex 40 22B-A2P3x104	Powtran PI130
Suministro de voltaje	5	5	5
Frecuencia de entrada	5	5	5
Potencia salida	5	4	5
Corriente salida	4	4	5
Entradas analógicas	5	0	5
Entradas digitales	4	4	5
Salidas analógicas	0	0	0
Costo	2	3	5
Total	30	25	35

En base a los requerimientos para el reómetro variador de frecuencia Powtran PI130 es el indicado para el trabajo debido a que cumple con la mayor parte de necesidades planteadas en la Tabla 11.

3.5. Selección del controlador

Para la selección del controlador es necesario tener en cuenta los siguientes parámetros detallados en la Tabla 14.

3.5.1. Tabla de selección del controlador

Tabla 14*Matriz de comparación tipos de controladores*

Requerimientos	Arduino Uno	ASTM32	myRIO - 1900	PLC Xinje
Versatilidad	Alta	Medio	Media	Baja
Robustez	Baja	Media	Media	Alta


 continua

Resolución [MHz]	16	72	667	50
Entradas/Salidas analógicas	6	10	10/6	8
Entradas/Salidas digitales	12	40	40	8
Costo	\$ 12	\$30	\$ 650	\$180

Tabla 15*Matriz de priorización controladores*

Requerimientos	Arduino Uno	ASTM32	myRIO - 1900	PLC Xinje
Versatilidad	5	2	3	2
Robustez	2	2	2	5
Resolución	1	4	5	3
Entradas/Salidas analógicas	4	4	5	4
Entradas/Salidas digitales	4	5	5	3
Costo	5	3	0	2
Total	21	20	20	19

El controlador utilizado es un Arduino Uno debido a la versatilidad y compatibilidad que ofrece con gran variedad de sensores en el mercado de bajo costo y de ámbito investigativo. Sin embargo, para futuros proyectos es recomendable utilizar un controlador más robusto. Arduino Uno es una placa electrónica basada en el microcontrolador ATmega328 basada en hardware y software libre, mismo que cuenta con 14 entradas / salidas digitales y otras 6 como entradas analógicas, este dispositivo tiene un reloj de 16MHz, conexión usb, conector de alimentación y un botón de reset como muestra la Figura 20.



Figura 20. Arduino UNO

Fuente: (Días, 2018)

3.6. Selección del encoder

Para la selección del sensor encoder es necesario tener en cuenta los siguientes parámetros detallados en la Tabla 16.

Los codificadores rotatorios (conocidos genéricamente como encoders) son mecanismos utilizados para entregar la posición, velocidad y aceleración del rotor de un motor. Sus principales aplicaciones incluyen aplicaciones en robótica, lentes fotográficas, aplicaciones industriales que requieren medición angular, militares, etc. Un encoder es un dispositivo electromecánico que convierte la posición angular de un eje, directamente a un código digital. (Venegas Requema, 2009)

3.6.1. Tabla de selección de encoder

Tabla 16*Matriz de comparación tipos de encoder*

Requerimientos	Encoder infrarrojo FC-03	Encoder incremental rotativo Maxwell	Encoder incremental rotativo Omron E6b2
Resolución [pulsos por vuelta]	20	1024	1000
Voltaje de entrada [Vdc]	5	8-30	12-24
Voltaje de salida [Vdc]	5	8-30	12-24
Fases de salida	1	3	3
Frecuencia máxima de respuesta [KHz]	0.66	100	50
Costo	\$4	\$136	\$50

Tabla 17*Matriz de priorización encoders*

Requerimientos	Encoder infrarrojo FC-03	Encoder incremental rotativo Maxwell	Encoder incremental rotativo Omron E6b2
Resolución [pulsos por vuelta]	1	5	4
Voltaje de entrada [Vdc]	5	2	2
Voltaje de salida [Vdc]	5	2	2
Fases de salida	4	5	5
Frecuencia máxima de respuesta [KHz]	3	5	5
Costo	5	1	2
Total	23	20	20

El encoder infrarrojo FC-03 incremental es el indicado debido a que la aplicación no requiere de una velocidad mayor a 100 rpm, y tiene compatibilidad con el controlador Arduino Uno.

3.7. Diseño del tablero eléctrico

Se seleccionaron y dimensionaron los siguientes elementos eléctricos.

Tabla 18

Listado de elementos eléctricos

Cantidad	Descripción	Detalle
1	Tablero metálico	40x50x25 cm
1	Canaleta ranurada	25x25 mm
3	Riel din metálica	-
1	Breacker bifásico Siemens	5A
1	Transformador bifásico 110/220	500 W
2	Fusibles	5A
1	Variador de frecuencia Powtran PI130	0.5 hp
2	Arduino Uno	-
10	Borneras	-
2	Módulos relé	-
1	Módulo DAC MCP4725	-
1	Encoder incremental FC-03	20 pulsos/vuelta

La disposición de cada componente dentro del tablero eléctrico se puede observar en anexos. De igual manera el diagrama de conexión que nos ayuda para guiarnos al momento de conectar los componentes o cuando se presente algún problema a futuro y poder resolver con mayor facilidad para realizar algún cambio se puede observar en anexos

3.8. Diseño de la estructura mecánica

3.8.1. Esquema de la estructura

Después de analizar varios esquemas iniciales se escogieron los dos mejores diseños como se puede observar en la Figura 21 que permiten al usuario ergonomía, facilidad de transportación, seguridad, limpieza permitiendo tener dos propuestas:

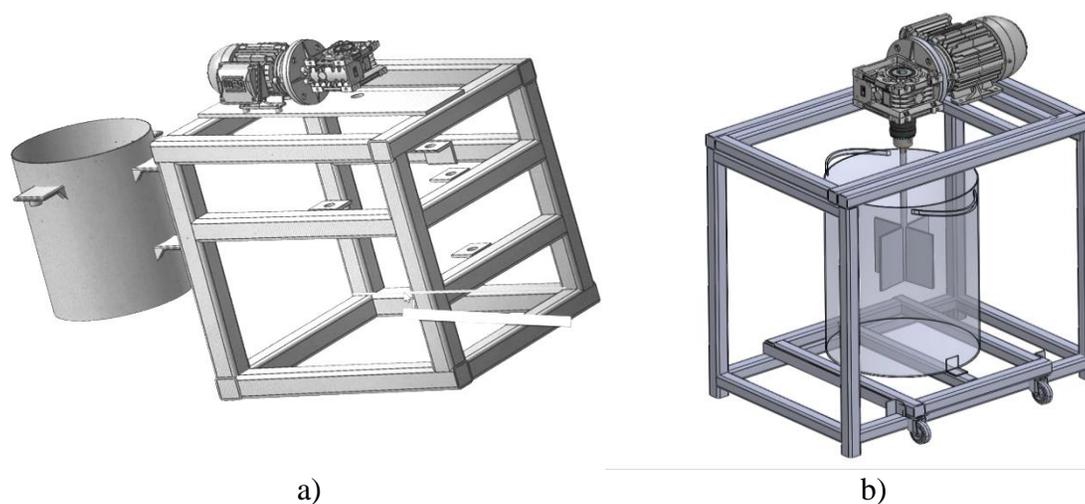


Figura 21. Esquema del reómetro a) Diseño inicial b) Diseño final

3.8.2. Selección de diseño para la estructura

Tabla 19

Selección del diseño

Requerimientos	Diseño 1	Diseño 2
Ergonomía	4	5
Transportación	3	4
Seguridad	4	5
Limpieza	2	5
Total	13	19

Por lo tanto, como se pudo observar el diseño 2 fue el más adecuado ya que dispone de varios factores mejorados al diseño inicial como por ejemplo al momento de desmontar el recipiente para agregar o quitar el material, gracias a las ruedas que se encuentran adheridas a la estructura se puede transportar evitando cargar al operario ya que se puede garantizar la seguridad.

3.8.3 Selección del material para la estructura

Tabla 20

Selección del material de la estructura

Requerimientos	Material		
	Acero AISI A36	Acero Inoxidable AISI 304	Aluminio 6063 t5
Manufactura	5	3	4
Límite elástico Mediante simulación	5	4	3
Peso	3	3	4
Costo	5	3	4
Total	18	13	15

Después de hacer un análisis sobre los factores más importantes para la selección del material de la estructura se recomienda elegir el Acero AISI A36 ya que cumple con las características óptimas para su correcto funcionamiento.

3.8.4 Selección del material para el recipiente

Tabla 21
Selección de material del recipiente

Requerimientos	Material		
	Acero Galvanizado	Acero Inoxidable AISI 304	Aluminio 1100 H-12
Manufactura	4	3	3
Límite elástico Mediante simulación	4	4	3
Peso	3	3	4
Costo	5	3	4
Total	16	13	14

Para la selección de material del recipiente se realizaron varias pruebas de simulación de la presión interna que va estar sometido por la influencia del agregado que se vaya a tratar en el reómetro, el material adecuado tras realizar las simulaciones es el Acero Galvanizado ya que aparte de ser reducido en costo se puede manufacturar con más facilidad que los otros materiales.

3.8.5 Selección del material para el vano

Tabla 22
Selección de material del vano

Requerimientos	Material		
	Acero ASTM A36	Acero Inoxidable AISI 304	Acero AISI 316L
Manufactura	5	3	4
Límite elástico Mediante simulación	5	4	3
Peso	3	3	4
Costo	4	2	3
Total	17	12	15

El material que se seleccionó para el vano es el Acero ASTM A36, después de hacer las correspondientes simulaciones como un objeto en voladizo con sus fuerzas aplicadas fue el más resistente.

CAPITULO 4

El capítulo mostrado a continuación contiene la evidencia de la construcción e implementación del diseño que se explicó en el capítulo anterior, además se realizarán pruebas con distintos tipos de sustancias para comprobar el correcto funcionamiento de la maquinaria, y se mostrarán los resultados obtenidos a partir de los datos obtenidos.

4. IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS

4.1. Montaje de los dispositivos electrónicos

En un comienzo se realizó el trazado donde irán cada una de las partes de acuerdo al plano diseñado en el capítulo 3, se atornillo las canaletas ranuradas para el cable y los rieles metálicos donde se sujetarán los elementos electrónicos. Figura 22

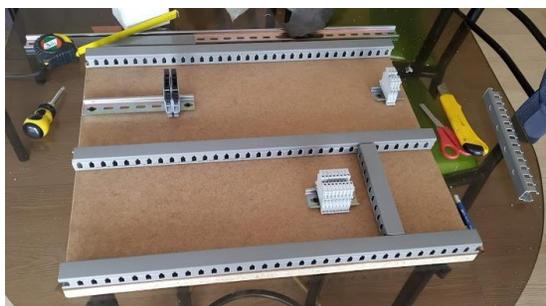


Figura 22. Sujeción rieles y canaletas al panel

Se realiza el cableado y el montaje de los elementos electrónicos. Figura 23



Figura 23. Cableado y montaje de elementos electrónicos

Se realiza el respectivo etiquetado en los cables, lo cual servirá por si es necesario mantenimiento.
Figura 24

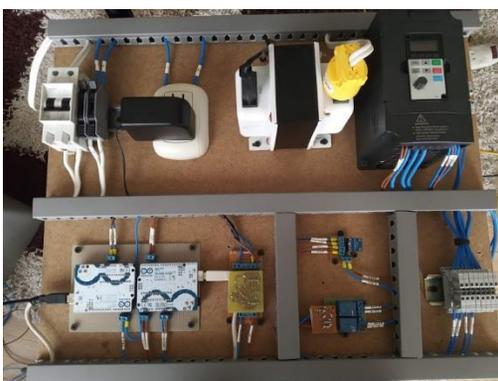


Figura 24. Etiquetado en el cableado

Se realiza el montaje en el gabinete metálico y se realizan pruebas de revisión en las conexiones.
Figura 25



Figura 25. Montaje gabinete metálico

4.2. Construcción de la estructura de soporte

Se realiza la soldadura en los marcos de tubo metálico previamente cortados a las medidas establecidas en la simulación de diseño del capítulo 3. Figura 26



Figura 26. Soldadura marcos de la estructura

Se arma los marcos soldados previamente y se sueldan los marcos para formar la base de la estructura. Figura 27



Figura 27. Armado del marco de la estructura

Se suelda los soportes que servirán para el motor y su caja reductora. Figura 28



Figura 28. Soportes para el motor y caja reductora

Se realiza el armado de la base para el recipiente y se hacen los ajustes necesarios para que se ensamble correctamente a la estructura. Figura 29



Figura 29. Base del recipiente

4.3. Construcción del recipiente metálico

Se realiza la construcción y montaje del recipiente de acuerdo al diseño del capítulo 3, se hacen pruebas para que no exista filtración de agua en los puntos de soldadura. Figura 30



Figura 30. Montaje y pruebas del recipiente metálico

4.4. Construcción del acople para el encoder

Para la sujeción del encoder ubicado en la caja de reducción se diseñó dos acoples mediante el uso de software CAD, mostrados en la figura 29 para posteriormente imprimir en 3D. El acople a) de la Figura 31 fue diseñado para sujetar la estructura del encoder a la caja de reducción, mientras el acople b fue diseñado para transmitir el movimiento hacia el eje del encoder y se pueda medir la velocidad correctamente.

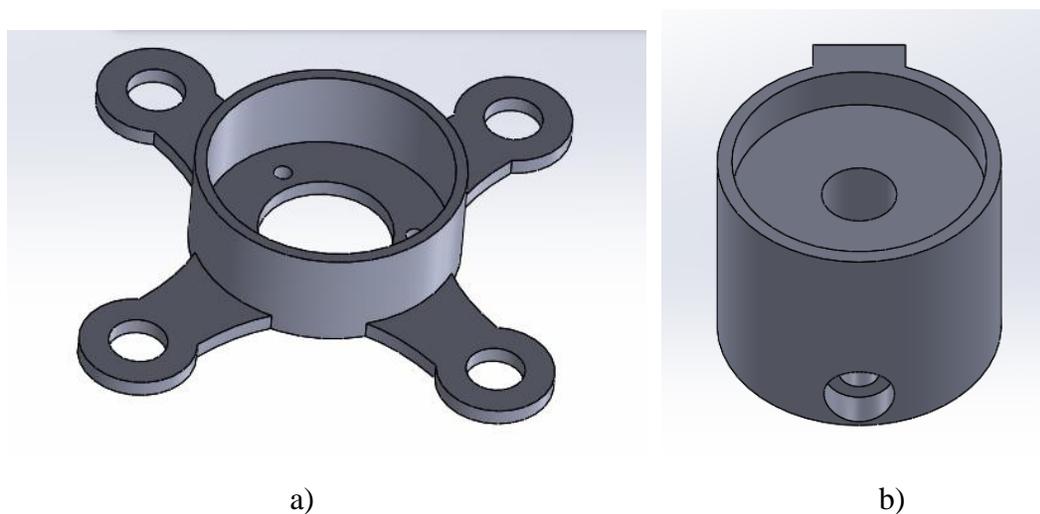


Figura 31. Acoples Encoder a) Acople para sujeción del encoder con la caja reductora
b) Acople para transmitir el movimiento de la caja reductora al eje del encoder

4.5. Montaje final de la estructura

Se realizan los acoples finales para unir el gabinete metálico a la estructura. Figura 32



Figura 32. Montaje del gabinete a la estructura

Se realizan las pruebas finales de funcionamiento en vacío, se realizan las correcciones necesarias y se comprueba que todos los elementos trabajen de acuerdo al diseño establecido.

Figura 33



Figura 33. Pruebas de funcionamiento en vacío

4.6. Programación y comunicación

El encendido y apagado del motor es por puerto serial desde el HMI hasta Arduino el cual envía señales digitales al variador de frecuencia Powtran, como podemos apreciar en el esquema de la Figura 34 siguiendo el diagrama de flujo de la Figura 35.



Figura 34. Esquema de Comunicación Control Encendido/Apagado Motor

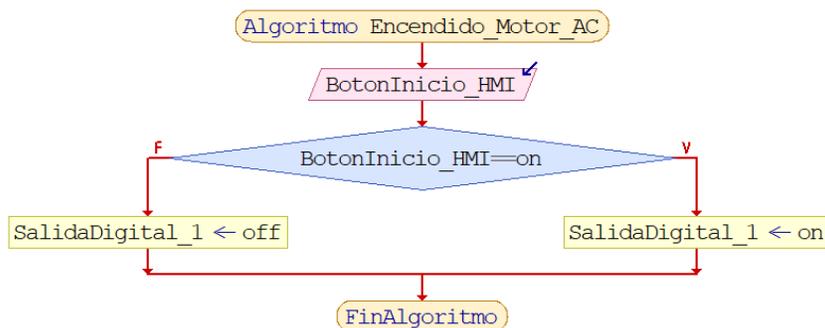


Figura 35. Diagrama de flujo Motor AC

El set point de torque es enviado desde el HMI hasta Arduino el cual por medio de un convertidor Digital – Analógico convierte la salida en un voltaje de 0-5 V, leído por el variador Powtran el cual interpreta este voltaje como una salida de frecuencia o torque dependiendo de la aplicación, siguiendo el diagrama de flujo de la Figura 37



Figura 36. Esquema de Comunicación Control Frecuencia/Torque Motor

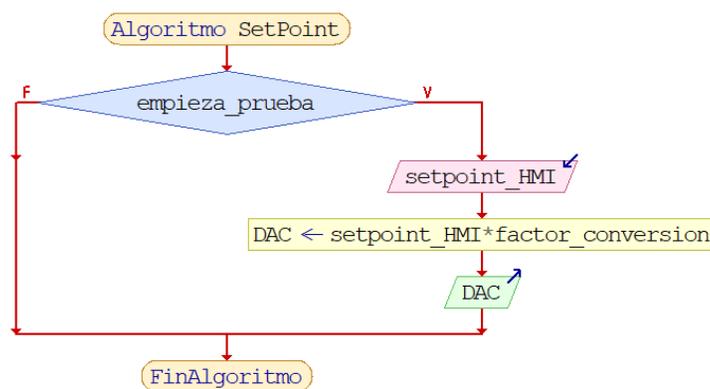


Figura 37. Diagrama de flujo Set Point

La velocidad del motor es recibida del variador de frecuencia Powtran PI130 por una salida analógica del mismo, esta es leída por Arduino y enviada por puerto serial a la interfaz HMI, siguiendo el diagrama de flujo de la Figura 39



Figura 38. Esquema de Comunicación Lectura rpm

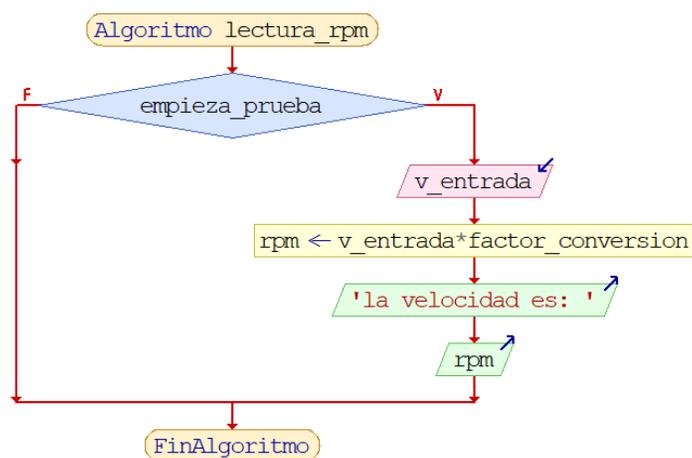


Figura 39. Diagrama de flujo lectura rpm

4.7. HMI

La pantalla de presentación consta de la información institucional, además del título del proyecto como se observa en la Figura 40.



Figura 40. Pantalla de presentación HMI

La pantalla de configuración de la geometría, permite ingresar las dimensiones del vano, mismo que sirve para cálculos posteriores, las dimensiones por defecto vienen impuestas para la geometría estándar diseñada en el capítulo 3, como se observa en la Figura 41.

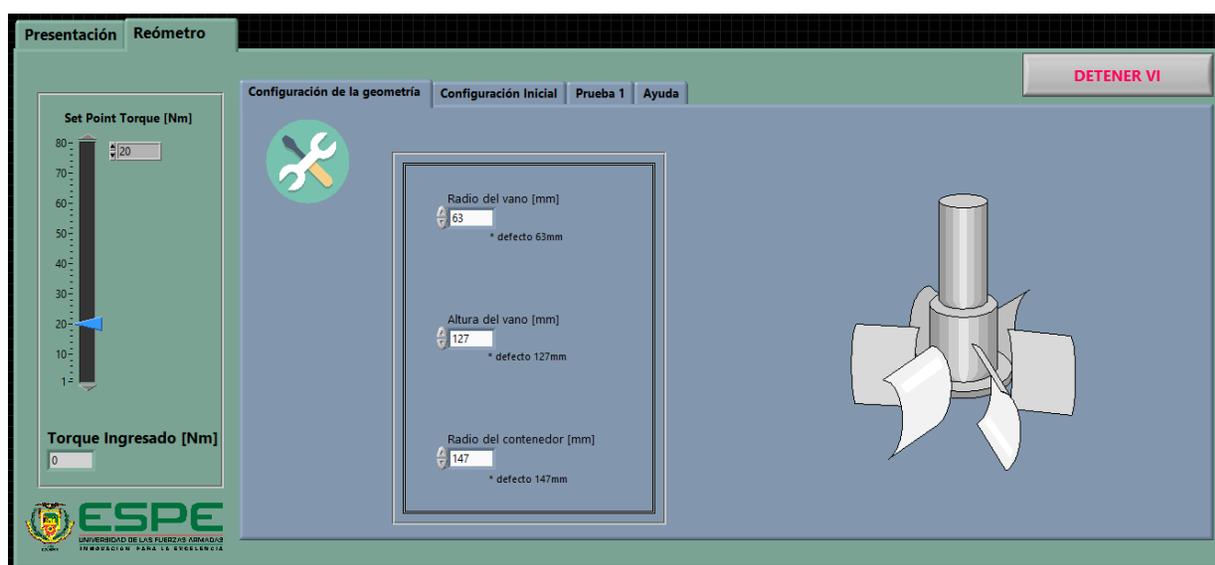


Figura 41. Pantalla configuración de la geometría

La pantalla de configuración inicial, se seleccionan los puertos seriales “COM” correspondientes a cada Arduino, además se configura la pestaña de almacenamiento de datos, en ella se selecciona la carpeta donde se almacenará la información, en la parte inferior se ingresa el nombre del archivo y finalmente se selecciona la frecuencia de muestreo deseada para el almacenamiento de valores, como se muestra en la Figura 42.

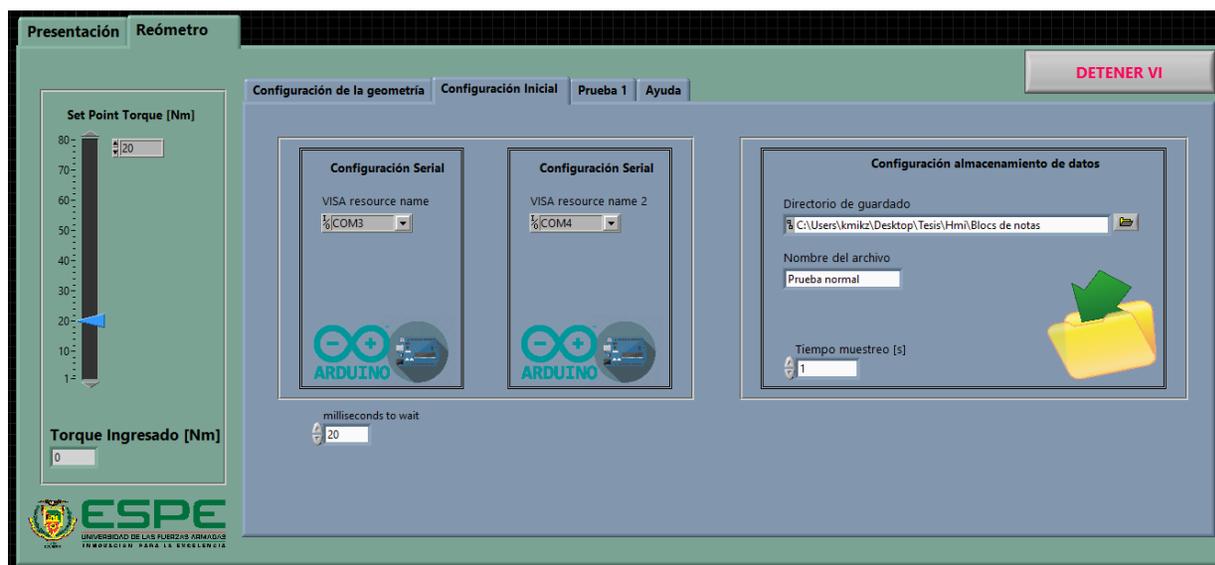


Figura 42 Pantalla configuración Inicial

La pantalla de prueba como se muestra en la Figura 43, El botón calibrar permite al equipo encender el motor y enviar un torque que permita romper la inercia de la mezcla, para luego permitir presionar el botón iniciar para empezar la recolección de datos, una vez finalizada la prueba se presiona el botón detener para apagar el motor y finalizar la recolección de información, en la izquierda tenemos la barra de selección de torque el cual solo se podrá modificar con el motor detenido. Toda esta información obtenida será guardada automáticamente en el documento seleccionado en el paso anterior. Esta pantalla posee varios indicadores; en la parte inferior se observa la velocidad a la cual el motor está funcionando en tiempo real, un indicador del torque ingresado y el tiempo que ha transcurrido en segundos, además una pantalla que muestra el comportamiento de la velocidad en tiempo real del equipo.

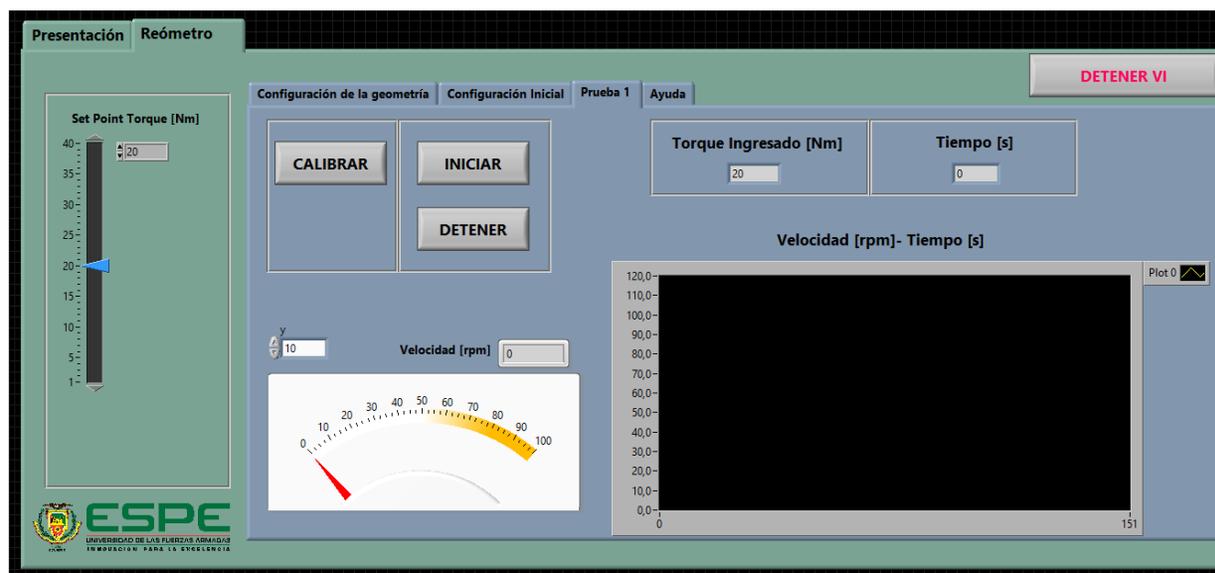


Figura 43. Pantalla de pruebas

Los datos obtenidos en la prueba se almacenan en un archivo Excel en el directorio ingresado en la pestaña de configuración inicial, en él se guardan los datos de velocidad en el transcurso del tiempo como se muestra en la Figura 44

	A	B	C
1	Prueba realizada: 6/1/2020	13:48:19	
2	Tiempo(s)	Velocidad(rpm)	
3		1	61
4		2	61
5		3	61
6		4	61
7		5	61
8		6	61
9		7	61
10		8	61
11		9	61
12		10	71
13		11	73
14		12	72
15		13	72
16		14	72
17		15	72
18		16	72
19		17	72
20		18	72
21		19	72
22		20	72
23		21	72
24		22	72
25		23	72
26		24	72
27		25	72
28		26	71
29		27	71
30		28	71
31		29	71
32		30	72
33		31	72
34		32	72

Figura 44. Almacenamiento de datos

Una vez realizada la prueba y el almacenamiento de información se abre el archivo Excel donde se encuentran los datos almacenados y se abre el formato Excel adjunto donde se importan automáticamente los valores y se realizan los cálculos necesarios, gráficas y tratamiento de información como se muestra en la Figura 45

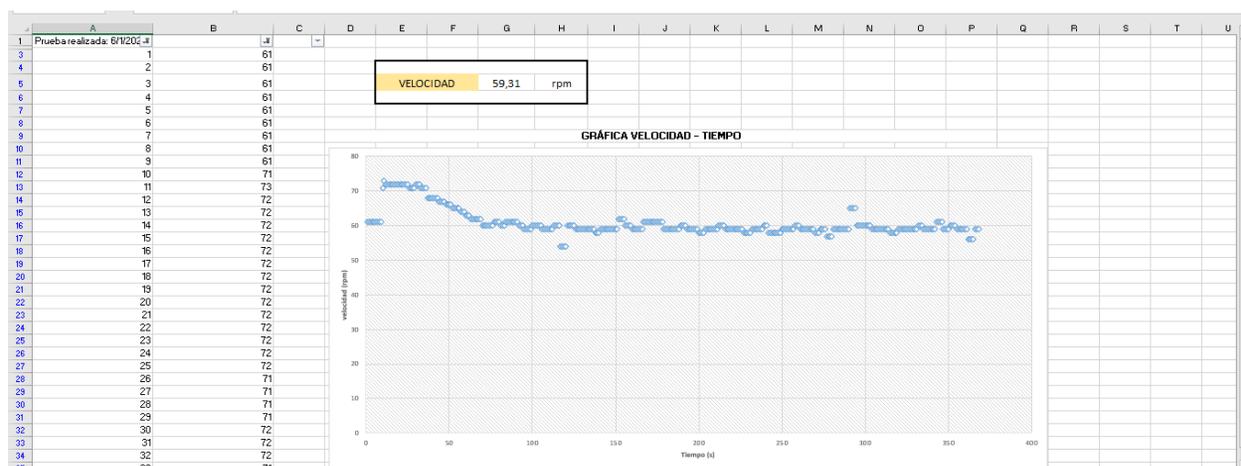


Figura 45. Tratamiento de información

La pantalla de ayuda como se muestra en la Figura 46, permite al usuario conocer los pasos y funcionalidades que presenta la interfaz, además de los parámetros que se deben tomar en cuenta para el correcto funcionamiento del programa.

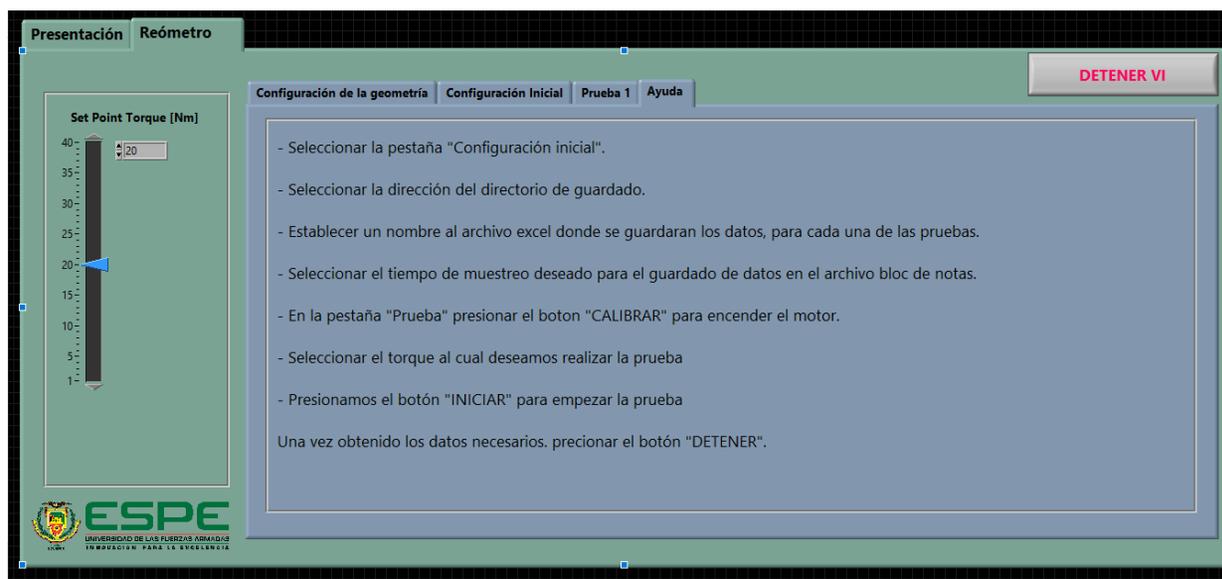


Figura 46. Pantalla de ayuda

4.8. Pruebas mecánicas

4.8.1. Pruebas en Vacío

Para la comprobación del funcionamiento del reómetro primero se realizó la prueba en vacío ingresando como set point distintos torques y poder verificar la velocidad angular en la que se llega a estabilizar, dado que estos datos serán procesados por el software para mostrar como resultado final las variables reológicas requeridas como el esfuerzo de corte y la velocidad de corte como se muestra en la Tabla 23.

Tabla 23
Pruebas en vacío

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5
Torque [Nm]	10	9,5	9	8,5	8,2
Velocidad [rpm]	71,95	69,72	63,27	58,17	56,56

Luego de realizar las diversas pruebas se hizo la adquisición de los datos obtenidos de velocidad en función del tiempo para cada uno de los valores de torque ingresados que podemos observar en anexos

4.8.2. Pruebas de repetibilidad

Una característica importante de una máquina de medición es que tenga una buena repetibilidad por lo cual, se realizó 4 ensayos utilizando 5 set point de torque distintos y se observó la velocidad en la cual se estabiliza en vacío por el método de los rangos, como se muestra en la Tabla 24

Tabla 24
Pruebas R y R

	P1 (10 Nm)	P2 (9,5 Nm)	P3 (9 Nm)	P4 (8,5 Nm)	P5 (8,2 Nm)
Operador 1	71,95	69,72	63,27	58,17	56,56
	71,85	69,68	63,25	58,11	56,25
	71,75	69,69	63,19	58,26	56,37
	71,62	69,73	63,35	58,14	56,48

continua

Operador 2	72,74	69,63	63,26	58,11	56,25
	71,65	69,71	63,29	58,19	56,41
	71,82	69,62	63,32	58,23	56,30
	71,94	69,65	63,19	58,10	56,50

A continuación, se calcula el rango, el cual se calcula: $R = x_{max} - x_{min}$, como se muestra en la Tabla 25

Tabla 25
Cálculo de rangos

	R1 (10 Nm)	R2 (9,5 Nm)	R3 (9 Nm)	R4 (8,5 Nm)	R5 (8,2 Nm)
Operador 1	0,33	0,05	0,16	0,15	0,31
Operador 2	0,29	0,09	0,13	0,13	0,25

Se calcula el rango promedio \bar{R} con los valores obtenidos en la Tabla 25., para finalmente obtener el promedio de los rangos $\bar{\bar{R}}$ como se muestra en la Tabla 26.

Tabla 26
Cálculo del promedio de los rangos

	Promedio \bar{R}
Operador 1	0,2
Operador 2	0,178
Rango promedio $\bar{\bar{R}}$	0,189

Del estudio de repetibilidad y reproducibilidad utilizando el método de promedios y rangos para el aseguramiento de la calidad de los resultados de calibración de acuerdo con la norma técnica nc iso/iec 17025, muestra la siguiente tabla donde se determina los valores de K1 y K2, en el cual se realizó 4 ensayos con 2 operadores

Número de ensayos	2	3	4	5
K1	4,56	3,05	2,50	2,21
Número de operadores	2	3	4	5
K2	3,65	2,70	2,30	2,08

Figura 47. Valor de constantes K1 y K2

Fuente: (NTC-ISO-17025)

Tabla 27

Valores de K1 y K2

	Valor
K1	2,50
K2	3,65

Se calcula la repetibilidad con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Repetibilidad} = \frac{K1 * \bar{R}}{\text{Tolerancia del equipo}} * 100\%$$

$$\% \text{ Repetibilidad} = \frac{2,50 * 0,189}{73} * 100\%$$

$$\% \text{ Repetibilidad} = 0,647 \%$$

El porcentaje de repetibilidad de la máquina al realizar las respectivas mediciones es de 0.647%, este porcentaje es aceptable y permitirá obtener datos confiables al realizar las correspondientes pruebas con hormigones autocompactantes.

4.8.3. Pruebas de reproducibilidad

Se calcula la medición promedio de cada operador.

$$\bar{x}_A = 63.87 \text{ rpm}$$

$$\bar{x}_B = 63.9 \text{ rpm}$$

Calculando la diferencia entre el promedio mayor y el menor se tiene.

$$\bar{x}_C = 63.9 - 63.87 = 0.03 \text{ rpm}$$

Usamos los valores de las constantes k1 y k2 seleccionadas en la Tabla 27 se obtiene el porcentaje de reproducibilidad a partir de la siguiente ecuación.

$$\% \text{ Reproducibilidad} = \frac{\sqrt{(K_2 * \bar{x}_C)^2 - \frac{(K_1 * \bar{R})^2}{nr}}}{\text{Tolerancia del equipo}} * 100\%$$

n = numero de muestras

r = numero de partes medidas

$$\% \text{ Reproducibilidad} = \frac{\sqrt{(3.65 * 0.03 \text{ rpm})^2 - \frac{(2.50 * 0.189 \text{ rpm})^2}{4 * 5}}}{73 \text{ rpm}} * 100\%$$

$$\% \text{ Reproducibilidad} = 0.04\%$$

El porcentaje de reproducibilidad de la máquina al realizar las mediciones es de 0.04%, este porcentaje está dentro del rango aceptable ya que permitirá obtener datos confiables al realizar las correspondientes pruebas con hormigones autocompactantes.

Se calcula el porcentaje de la relación entre la repetibilidad y la reproducibilidad por medio de la siguiente ecuación.

$$\%R\&R = \sqrt{(\% \text{ Repetibilidad})^2 + (\% \text{ Reproducibilidad})^2}$$

$$\%R\&R = \sqrt{(0.647\%)^2 + (0.04\%)^2} = 0.65\%$$

De acuerdo con el estudio los indicadores del %R&R muestra que si el valor es igual o menor al 15% el sistema es apropiado para la aplicación diseñada.

4.8.4. Estudio de Confiabilidad

Se realizó las pruebas con 3 diferentes concentraciones de espesante con agua mostradas en la Tabla 28 mediante el uso del equipo realizado junto al reómetro del laboratorio de Reología, en

los cuales se determina el error en las medidas reológicas comparando las gráficas de los dos reómetros.

Tabla 28

Pruebas con diferentes concentraciones

	Prueba 1	Prueba2	Prueba3
Agua	20 L	20 L	20 L
Espesante	150 g	300 g	500 g

Se realizaron 3 pruebas, ingresando como set point distintos valores de torque y se obtuvo el valor de velocidad donde se estabiliza, este valor fue tomado 4 veces para obtener una mejor apreciación, como se muestra en la Tabla 47.

Prueba 1 con 150g de espesante:

Tabla 29

Prueba 1 con el reómetro Construido

	Prueba 1				
Torque [Nm]	9,8	9,5	9,3	9	8,7
Velocidad [rpm]	73,1	71,4	68,3	66,1	63,2
	72,9	71,1	68,7	66,5	63,5
	72,4	70,7	69,1	66,9	64,1
	73	70,3	69,4	67,4	64,3
Velocidad promedio [rpm]	72,85	70,88	68,88	66,73	63,78

A continuación, se transforma la velocidad angular a velocidad de corte y el esfuerzo de corte multiplicado por el factor de corrección como se muestra en la Tabla 30.

Factor de Corrección:

$$y = ((0,7073x + 6,0228) * 1,8579) + 174,28$$

Tabla 30

Cálculo de esfuerzo cortante y velocidad de corte

Prueba 1					
Esfuerzo de corte [Pa]	211,27	210,27	209,25	208,16	206,66
Velocidad De corte [1/s]	19,91	19,37	18,82	18,24	17,43

Se realizó el ensayo en el reómetro del laboratorio de reología utilizando los mismos valores de velocidad de corte obtenidos anteriormente para determinar el esfuerzo cortante.

Tabla 31

Prueba 1 con el reómetro del Laboratorio de Reología

Esfuerzo cortante [Pa]	Velocidad De corte [1/s]
211,51	19,91
210,49	19,37
209,53	18,82
208,32	18,24
206,98	17,43

Se calculó el error entre el esfuerzo cortante de los dos reómetros usados en los ensayos respectivos.

Tabla 32

Prueba 1 Cálculo del error

Valor Real [Pa]	Valor Medido [Pa]	% Error
211,27	211,51	0,11
210,27	210,49	0,11
209,25	209,53	0,13
208,16	208,32	0,08
206,66	206,98	0,15
% de error Promedio		0,12

Una vez calculado el error promedio se procede a comparar las dos gráficas de los ensayos entre los reómetros.

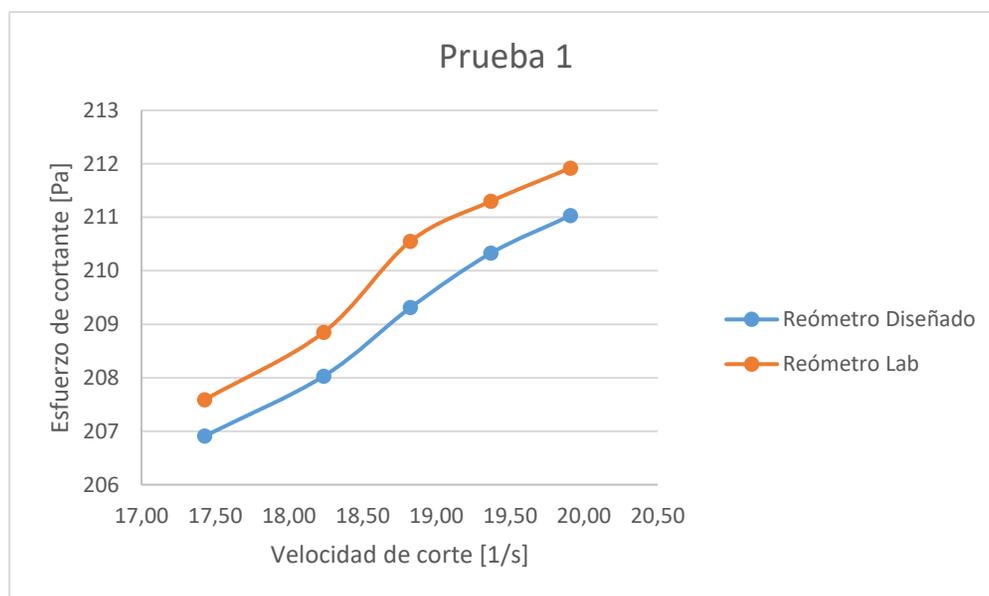


Figura 48. Gráfica de comparación entre los dos reómetros

Prueba 2 con 300g de espesante:

Tabla 33

Prueba 2 con el reómetro Construido

Prueba 2					
Torque [Nm]	9,8	9,5	9,3	9	8,7
	72,5	69,2	68,1	66,8	64,2
Velocidad [rpm]	72,9	69,01	67,9	66,2	63,9
	72,4	68,8	67,4	65,9	63,5

continua

	72	68,5	67,2	65,4	63,1
Velocidad promedio [rpm]	72,45	68,88	67,65	66,08	63,68

A continuación, se transforma la velocidad angular a velocidad de corte y el esfuerzo de corte multiplicado por el factor de corrección como se muestra en la Tabla 34.

Tabla 34

Cálculo de esfuerzo cortante y velocidad de corte

Prueba 2					
Esfuerzo de corte [Pa]	211,03	209,91	209,16	208,03	206,91
Velocidad De corte [1/s]	19,80	18,42	18,49	18,06	17,40

Se realizó el ensayo en el reómetro del laboratorio de reología utilizando los mismos valores de velocidad de corte obtenidos anteriormente para determinar el esfuerzo cortante.

Tabla 35

Prueba 2 con el reómetro del Laboratorio de Reología

Esfuerzo cortante [Pa]	Velocidad De corte [1/s]
211,70	19,80
210,52	18,42
209,89	18,49
208,76	18,06
207,38	17,40

Se calculó el error entre el esfuerzo cortante de los dos reómetros usados en los ensayos respectivos.

Tabla 36

Prueba 2 Cálculo del error

Valor Real [Pa]	Valor Medido [Pa]	% Error
212,7	212,25	0,21
211,9	211,3	0,28
210,98	210,4	0,27
209,98	209,52	0,22
208,2	207,69	0,24
% de error Promedio		0,25

Una vez calculado el error promedio se procede a comparar las dos gráficas de los ensayos entre los reómetros.

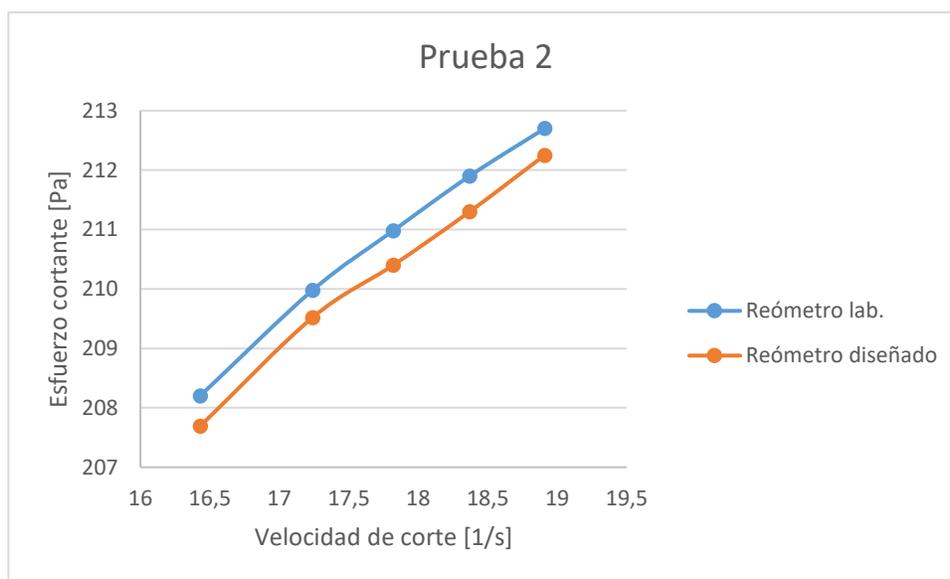


Figura 49. Gráfica de comparación entre los dos reómetros

Prueba 3 con 500g de espesante:

Tabla 37

Prueba 3 con el reómetro Construido

Prueba 3					
Torque [Nm]	9,8	9,5	9,3	9	8,7
Velocidad [rpm]	71,2	68,1	66,2	63,1	60,1
	71,5	68,1	66,2	63,2	60,3
	71	67,9	66,1	63,1	59,9
	69,8	68,3	65,9	62,8	60,2

continua

Velocidad promedio [rpm]	70,88	68,1	66,1	63,05	60,13
---------------------------------	-------	------	------	-------	-------

A continuación, se transforma la velocidad angular a velocidad de corte y el esfuerzo de corte multiplicado por el factor de corrección como se muestra en la Tabla 38.

Tabla 38

Cálculo de esfuerzo cortante y velocidad de corte

Prueba 3					
Esfuerzo de corte [Pa]	211,03	209,91	209,16	208,03	206,91
Velocidad De corte [1/s]	19,37	18,61	18,06	17,23	16,43

Se realizó el ensayo en el reómetro del laboratorio de reología utilizando los mismos valores de velocidad de corte obtenidos anteriormente para determinar el esfuerzo cortante.

Tabla 39

Prueba 3 con el reómetro del Laboratorio de Reología

Esfuerzo cortante [Pa]	Velocidad De corte [1/s]
211,92	19,37
211,3	18,61
210,55	18,06
208,85	17,23
207,59	16,43

Se calculó el error entre el esfuerzo cortante de los dos reómetros usados en los ensayos respectivos.

Tabla 40

Prueba 3 Cálculo del error

Valor Real [Pa]	Valor Medido [Pa]	% Error
213,92	213,03	0,42
212,89	212,2	0,32
211,98	211,16	0,39
211,2	210,4	0,38
209,59	209,01	0,28
% de error Promedio		0,36

Una vez calculado el error promedio se procede a comparar las dos gráficas de los ensayos entre los reómetros

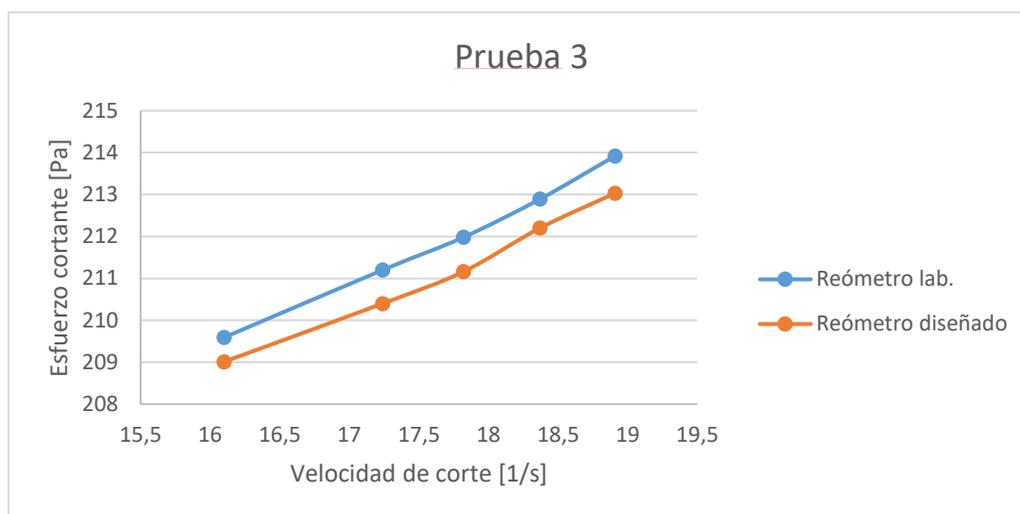


Figura 50. Gráfica de comparación entre los dos reómetros

Una vez determinado el error en las muestras se obtiene el error promedio obtenido del equipo como se muestra en la Tabla 41.

Tabla 41

Error promedio del equipo diseñado

	% Error
Prueba 1	0,12
Prueba 2	0,25
Prueba 3	0,36
Sumatoria	0,73
% de error Promedio	0,24

De lo cual obtenemos que el error promedio del equipo comparado a las mediciones realizadas en el reómetro de laboratorio es de 0.34%.

4.8.5. Pruebas con agua

Se realizó las pruebas con 20L de agua y se obtuvieron las velocidades estacionarias a distintos torques ingresados como se muestra en la Tabla 42.

Tabla 42
Recolección de datos

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Prueba 6
Torque [Nm]	9,8	9,3	9,0	8,7	8,5	8,3
Velocidad [rpm]	70	66	62	60	57	54
	71	66	63	60	57	55
	70	67	63	59	58	55
	71	67	63	59	58	55
Velocidad promedio [rpm]	70,5	66,5	63	59,5	57,5	55

A continuación, se transforma las unidades de velocidad a rad/s como se muestra en la Tabla 43.

Tabla 43
Conversión de unidades de velocidad

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Prueba 6
Torque [Nm]	9,8	9,3	9,0	8,7	8,5	8,3
Velocidad promedio [rad/s]	7,38	6,96	6,60	6,23	6,02	5,76

Se determina el valor de la velocidad de corte y el esfuerzo cortante en nuestro reómetro como se muestra en la Tabla 44 y se realiza la gráfica esfuerzo cortante – velocidad de corte Figura 51.

Tabla 44

Cálculo esfuerzo cortante - velocidad de corte

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Prueba 6
Esfuerzo cortante [Pa]	19,78	18,77	18,17	17,56	17,16	16,75
Velocidad De corte [1/s]	19,27	18,17	17,22	16,26	15,71	15,03

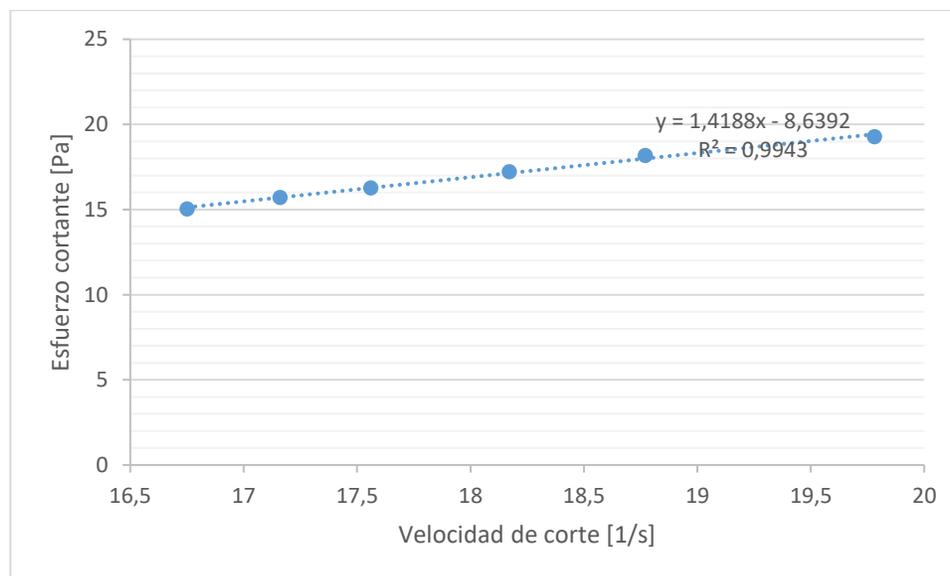


Figura 51. Gráfica Esfuerzo cortante - Velocidad de corte, Agua

Se halla la viscosidad dividiendo el esfuerzo cortante para la velocidad de corte como se muestra en la Tabla 45.

Tabla 45
Cálculo viscosidad del agua

Esfuerzo de corte [Pa]	Velocidad de corte [1/s]	Viscosidad
19,78	19,27	1,02
18,77	18,17	1,03
18,17	17,22	1,05
17,56	16,26	1,08
17,16	15,71	1,09
16,75	15,03	1,11

4.8.6. Pruebas con hormigón

Se realizó las pruebas en una composición de hormigón en las siguientes cantidades como se muestra en la Tabla 46.

Tabla 46
Composición mezcla de hormigón 1:2:2

	Cantidad
Cemento	8,36 Kg
Arena	1040 cm ³
Grava	1040 cm ³
Agua	4.68 L

Se realizaron 6 pruebas, ingresando como set point distintos valores de torque y se obtuvo el valor de velocidad donde se estabiliza, este valor fue tomado 4 veces para obtener una mejor apreciación, como se muestra en la Tabla 47.

Tabla 47
Prueba hormigón 1:2:2

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13
Torque [Nm]	11,9	11,5	11,3	10,8	10,5	10,2	10	9,5	9,2	9	8,9	8,6	8,5
Velocidad [rpm]	72,5	69,4	68,9	68	66	65	64,5	60,5	58	56,5	56	55,4	53,4
	72,5	69,5	69	68,1	65,9	65	64,4	60,5	58	56,5	56	55,5	53,3
	72,5	69,5	69	68	66	65	64,5	60,4	58	56,4	56	55,5	53,4
	72,4	69,5	69	68	66	65	64,5	60,5	57,1	56,5	55,9	55,5	53,4
Velocidad promedio [rpm]	72,5	69,5	69	68	66	65	64,5	60,5	58	56,5	56	55,5	53,4

A continuación, se transforma las unidades de velocidad a rad/s como se muestra en la Tabla 48

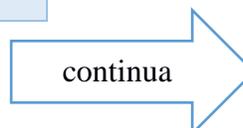
Tabla 48
Conversión de unidades de velocidad

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13
Torque [Nm]	11,9	11,5	11,3	10,8	10,5	10,2	10	9,5	9,2	9	8,9	8,6	8,5
Velocidad promedio [rad/s]	7,59	7,28	7,23	7,12	6,91	6,81	6,75	6,34	6,07	5,92	5,86	5,81	5,59

Se determina el valor de la velocidad de corte y el esfuerzo cortante en nuestro reómetro como se muestra en la Tabla 49 y se realiza la gráfica Esfuerzo cortante – Velocidad de corte Figura 52.

Tabla 49
Cálculo esfuerzo cortante y velocidad de corte

	Esfuerzo cortante [Pa]	Velocidad De corte [1/s]
P1	218,91	7,59



P2	217,41	7,28
P3	216,66	7,23
P4	214,78	7,12
P5	213,66	6,91
P6	212,53	6,81
P7	211,78	6,75
P8	209,91	6,34
P9	208,78	6,07
P10	208,03	5,92
P11	207,66	5,86
P12	206,53	5,81
P13	206,16	5,59

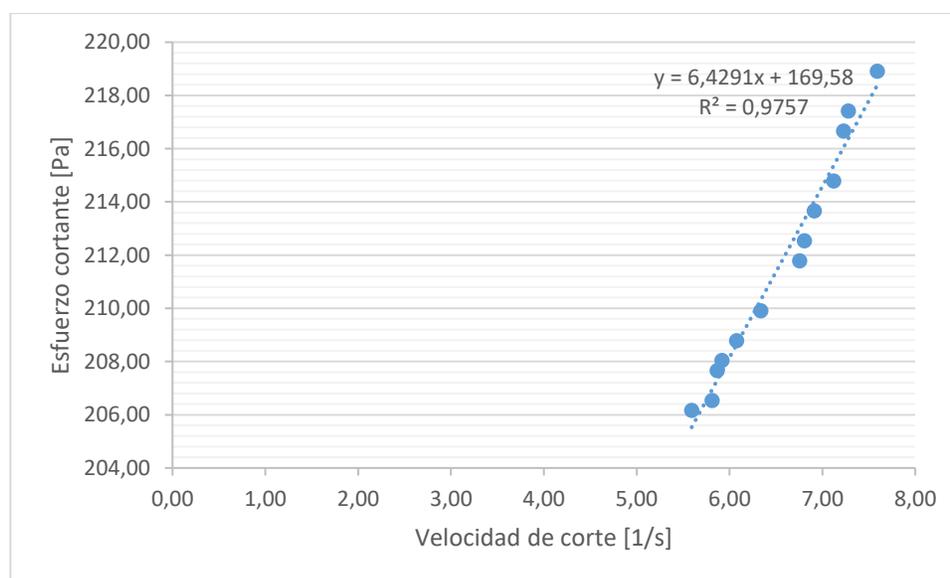


Figura 52. Gráfica Esfuerzo cortante - Velocidad de corte hormigón

Se halla la viscosidad dividiendo el esfuerzo cortante para la velocidad de corte como se muestra en la Tabla 50.

Tabla 50
Cálculo de viscosidad

Esfuerzo de corte [Pa]	Velocidad de corte [1/s]	Viscosidad
218,91	7,59	28,83
217,41	7,28	29,87
216,66	7,23	29,98
214,78	7,12	30,16
213,66	6,91	30,91
212,53	6,81	31,22
211,78	6,75	31,35
209,91	6,34	33,13
208,78	6,07	34,37
208,03	5,92	35,16
207,66	5,86	35,41
206,53	5,81	35,54
206,16	5,59	36,87

CAPITULO 5

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1. Conclusiones

Para la construcción del reómetro se diseñó cada componente mecánico en un software CAD verificando sus medidas y ubicación en el ensamble, esto nos permitió realizar los cambios adecuados antes de la construcción de la estructura del equipo.

Se diseñó varias disposiciones estructurales para el bastidor del reómetro ya que a esta parte van sujetos los componentes tanto mecánicos como eléctricos, se seleccionó la disposición más eficiente que nos permite ergonomía y seguridad.

Se seleccionó el materia ASTM A36 para el diseño de la estructura metálica ya que mediante simulaciones se determinó que soporta los esfuerzos mecánicos ocasionados por el motor y el peso del hormigón.

Una de las partes más críticas al hacer el diseño fue sujetar el recipiente a la estructura para que pueda soportar el peso del recipiente junto al del hormigón, también que sea desmontable para la limpieza, tras analizar cada una de las opciones se decidió usar el diseño que cumple con los requisitos para su correcto funcionamiento.

Mediante simulación se obtuvo el valor del factor de seguridad que es aceptable ya que cumple con el rango, se lo realizó para cada componente crítico del reómetro.

Para el interfaz humano maquina (HMI) se usó el software LabVIEW ya que es compatible con los sensores que usamos, así como el controlador y dispone de las herramientas necesarias para observar el comportamiento de las variables medidas.

Se seleccionó un motor de $\frac{1}{2}$ hp trifásico con una caja reductora sin fin corona de relación 40:1 mismo que fue dimensionado con sus respectivos cálculos para garantizar que tenga la potencia suficiente para la mezcla de hormigón.

Se desarrolló el control de cizalla continua para medir los cambios reológicos del hormigón con sus respectivas variables que se presentan durante las pruebas.

El reómetro está programado para ingresar por medio de la interfaz un valor de torque, mismo que nos permite recibir la variable de velocidad angular, para posteriormente obtener el esfuerzo cortante y la velocidad de corte.

En el estudio de repetibilidad y reproducibilidad del equipo se usó el método de promedios y rangos de acuerdo a la norma NC ISO/IEC 17025, se obtuvo un porcentaje de repetibilidad de 0.647% y de reproducibilidad de 0.04% que son valores aceptables para tomar los datos adecuados durante el ensayo reológico.

El porcentaje de repetibilidad y reproducibilidad (%R&R) de acuerdo con el estudio muestra que si el valor es igual o menor al 15% el sistema es apropiado para la aplicación diseñada, por lo tanto, en este caso cumple con el rango de aceptación ya que como resultado dio 0.65%.

La confiabilidad del equipo fue comparada con el reómetro del laboratorio de reología en el cual se obtuvo un error de 0.34% según los estudios realizados.

5.2. Recomendaciones

Se debe realizar una limpieza del equipo luego de finalizar con las pruebas requeridas debido a sé que trabaja con materiales que al secarse pueden crear acumulación en varias partes del envase como en el vano que son los componentes mecánicos que están en contacto directo con la mezcla.

Debido a que se limitó a una cierta cantidad de recursos económicos para la construcción del reómetro se garantizó su funcionalidad con todo lo implementado, pero en el caso de hacer un enfoque a mayor robustez en la parte de control se recomienda usar una tarjeta de adquisición de datos con mayor resolución ya que este tipo de tarjeta no se la encuentra con facilidad en el mercado.

En el caso que no se tenga un ordenador para conectarse con el reómetro y poder ingresar al programa se recomienda implementar un touch panel al gabinete del equipo ya que de esta manera se podría usar en campo sin riesgo a que se desconecte el equipo o sufra algún tipo de interferencia con el ordenador.

Al momento de añadir el material al recipiente es necesario depositar la mezcla lista para medir sus variables reológicas ya que el recipiente se puede dañar si se realiza la preparación del material dentro de el mismo.

En el caso de presentar algún problema con la medición de las variables es recomendable revisar el manual del variador de frecuencia ya que éste dispone de varias configuraciones de fábrica que muchas veces dificultan el comportamiento deseado.

Si se presenta el caso de ocupar el reómetro para medida de fluidos con mayor viscosidad que el hormigón es necesario configurar la entrada analógica del variador para usar el motor en su máxima capacidad de torque.

Para poder implementar el sistema de cizalla oscilatoria es necesario adquirir un servomotor mismo que facilita el cambio de giro e implementar un sensor de torque industrial, ya que son instrumentos que ofrecen mayor sensibilidad y velocidad de respuesta.

5.3. Trabajos futuros

Para trabajo futuro se plantea implementar un sistema con control de temperatura para poder medir los cambios reológicos con diferentes materiales que necesiten estar en altas temperaturas, para esto se debe incluir a la estructura material refractario junto a niquelinas ya que se dejó el espacio adecuado para realizar esta modificación.

BIBLIOGRAFÍA

- Burón Maestro, M. (2006).
- Coker, A. K. (2001). *Modeling of chemical kinetics and reactor design*. Houston, Texas: Gulf Publishing Company.
- Coussot, P. (2005). *Rheometry of Pastes, Suspensions and Granular Materials*. New York: John Wiley & Sons.
- Daczko, J. (2012). *Hormigón Autocompactante*. New York: Spon Press.
- Días. (28 de Enero de 2018). *Mi Arduino*. Obtenido de <http://www.iescamp.es/miarduino/author/jadiaz/>
- Fernández Canovas, M. (1989). Hormigón. *Servicio de Publicaciones. Colegio de Ingenieros de caminos canales y puertos*.
- Fernández Gómez, J. (2019). *Propiedades y empleo del hormigón autocompactante*. Quito.
- Garzón, M. (2012). Módulo estático de elasticidad del hormigón en base a su resistencia a la compresión simple. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/155>.
- GmbH, A. P. (13 de Enero de 2020). *Anton Paar*. Obtenido de <https://www.anton-paar.com/es-es/productos/detalles/sistemas-reologicos-de-medicion/>
- Instruments, G. (15 de 03 de 2019). *Germann Instruments*. Obtenido de <http://germann.org/products-by-application/rheology-of-concrete/icar-rheometer>
- Juradin, S. (22 de 2 de 2012). Determination of Rheological Properties of Fresh Concrete and Similar Materials in a Vibration Rheometer. pág. 150.
- Koehler, E. P. (2004). Development of a Portable Rheometer for Fresh Portland Cement Concrete. 328.
- Laskar, A., & Bhattacharjee, R. (2011). *Construction and Building Materials*. Assam.
- Macosko, C. W. (1994). *Rheology Principle, Measurements and Applications*. New York: Wiley-VCH.
- Mataix, C. (2006). *Mecánica de fluidos y Máquinas Hidráulicas*. New York: Alfaomega.
- Miniparc, C. (2018). *Iesmat*. Obtenido de https://iesmat.com/catalogos/WC_REOLOGIA/reologia
- Miranda, J. (1999). Aportaciones al estudio de pastas y morteros de cemento portland. *U. Cevilla*, 59.
- NTC-ISO-17025. (s.f.). Requisitos generales de competencia de laboratorios de ensayos y calibración.
- Panalytical, M. (Lunes de Enero de 2020). *Malvern Panalytical Ltd*. Obtenido de <https://www.malvernpanalytical.com/es/products/technology/rheometry>
- Pardo, O. (2012). *Universidad Mayor de San Andrés*. San Andrés: UMSA.
- Piñero. (2015). *Proyectos*. Obtenido de <http://bibing.us.es>

- Ramírez-Navas, J. S. (2006). *Introducción a la reología*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/259620275_Introduccion_a_la_Reologia_de_Alimentos
- Rheological, M. P. (2019). *Malvernpanalytical*. Obtenido de <https://www.malvernpanalytical.com/en/products/measurement-type/rheology-viscoelasticity>
- Rojas, O. (15 de 3 de 2019). *Introducción a la reología*. Obtenido de firp: <http://www.firp.ula.ve/archivos/cuadernos/S520B.pdf>
- Roussel, N. (2012). *Understanding_the_Rheology_of_concrete*. Philadelphia: Woodhead Publishing.
- Uribe, V. C. (2013). *Diseño y cálculo de un agitador de fluidos*. Universidad del BÍO-BÍO.
- Venegas Requema, J. (2009). *Encoders*. Valparaíso.
- WEG. (2019). *WEG ELECTRIC CORP. U.S. HEADQUARTERS*. Obtenido de <https://www.weg.net/institutional/BS/es/>
- WEG. (2019). *WEG ELECTRONIC CORP. US HEADQUARTERS*. Obtenido de <https://www.weg.net/institutional/BS/es/>

ANEXOS: