

ESTRUCTURAR LOS LINEAMIENTOS PARA LA REALIZACIÓN DE LA NORMA
DE ENSAYO DE FATIGA MULTIAXIAL

GERMAN ANDRES BEDOYA ARIZA
NICOLAY DAVID CAMARGO ARIAS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2025

ESTRUCTURAR LOS LINEAMIENTOS PARA LA REALIZACIÓN DE LA NORMA
DE ENSAYO DE FATIGA MULTIAXIAL.

GERMAN ANDRES BEDOYA ARIZA
NICOLAY DAVID CAMARGO ARIAS

Trabajo de grado para optar título de Ingeniero mecánico

Director:

PhD. ALBERTO DAVID PERTUZ COMAS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA
AÑO 2025

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	17
1. OBJETIVOS.....	19
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	19
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
2. MARCO REFERENCIAL	20
2.1. MARCO DE ANTECEDENTES.....	20
2.2. MARCO TEÓRICO.....	21
Descripción de la técnica.....	21
2.2.1. Métodos de prueba de fatiga multiaxial (ISO/TR 12112, 2012)	22
2.2.1.1. Axial + torsión (ISO/TR 12112, 2012).....	23
2.2.1.2. Axial + presión interna (ISO/TR 12112, 2012).....	23
2.2.1.3. Axial + presión interna + presión externa (ISO/TR 12112, 2012)	23
2.2.1.4. Axial + presión interna + presión externa + torsión (ISO/TR 12112, 2012)	24
2.2.1.5. Cruciform — lcf (ISO/TR 12112, 2012)	24
2.2.2. Normas técnicas.....	24
2.2.3. Equipos utilizados comercialmente para pruebas de fatiga multiaxial.	25
2.2.3.1. Máquina de fatiga por flexión rotativa arbm	25
2.2.3.2. Máquina de fatiga multiaxial electroforce 9400.....	27
3. DISEÑO METODOLÓGICO	27
4. FASE 1: IMPORTANCIA DEL ENSAYO DE FATIGA MULTIAXIAL.....	28
5. FASE 2: COMPONENTES DE LA MÁQUINA DE FATIGA MULTIAXIAL	33
5.1. MÁQUINA DE FATIGA MULTIAXIAL (UIS Patente nº WO2018116092, 2016)	34
5.2. BASTIDOR	34

5.3.	SISTEMA ROTACIONAL 1	35
5.4.	MECANISMO RECIPROCANTE (8)	36
5.5.	SISTEMA ROTACIONAL 2	37
6.	FASE 3: DISPOSITIVOS DE AGARRE DE LAS MUESTRAS DE ACUERDO CON EL TIPO DE MATERIAL QUE SE DESEA CARACTERIZAR	38
6.1.	ELEMENTOS DE SUJECIÓN.....	38
7.	FASE 4: DOCUMENTAR EL PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE UN ENSAYO DE FLEXIÓN ROTATIVA, FLEXIÓN ALTERNATIVA Y FATIGA MULTIAXIAL	40
7.1.	ENSAYO DE FLEXIÓN ROTATIVA	40
7.1.1.	Forma y tamaño de la muestra.....	40
7.1.1.1.	Forma de la sección de prueba	40
7.1.1.2.	Dimensión de las muestras	42
7.1.2.	Preparación de las muestras.....	42
7.1.2.1.	General.....	42
7.1.2.2.	Marcado de la muestra.....	42
7.1.3.	Procedimiento de prueba	43
7.1.3.1.	Montaje de la muestra:	43
7.1.3.1.1.	Alineación adecuada:	43
7.1.3.1.2.	Dispositivos de sujeción:	43
7.1.3.1.3.	Precisión en el montaje:	43
7.1.3.1.4.	Montaje en la máquina:.....	44
7.1.3.1.5.	Verificación de la muestra:.....	44
7.1.3.2.	Aplicación de la fuerza	44
7.1.3.2.1.	Control de la fuerza:	44
7.1.3.2.2.	Registro de la fuerza:	45

7.1.3.2.2.1. Medición de la fuerza:	45
7.1.3.2.3. Relación carga esfuerzo:	45
7.1.3.2.4. Elección de la fuerza a aplicar en el ensayo:	46
7.1.3.2.5. Monitoreo de la prueba:	47
7.1.3.3. Selección de la frecuencia:	47
7.1.3.3.1. Importancia de la frecuencia:	47
7.1.3.3.1.1. Representatividad de las condiciones reales:	47
7.1.3.3.1.2. Duración de la prueba:	47
7.1.3.3.1.3. Precisión y reproducibilidad:	48
7.1.3.3.2. Factores que considerar	48
7.1.3.3.2.1. Propiedades mecánicas de la muestra.....	48
7.1.3.3.2.2. Sensibilidad a la temperatura.....	48
7.1.3.3.2.3. Condiciones de prueba.....	48
7.1.3.3.2.4. Durabilidad y vida útil:.....	48
7.1.3.3.2.5. Capacidad del equipo de ensayo - precisión y estabilidad	49
7.1.3.3.2.6. Limitaciones del equipo.....	49
7.1.3.3.3. Dispositivo de selección de frecuencia	49
7.1.3.3.4. Registro de la frecuencia.....	50
7.1.3.3.4.1. Documentación.....	50
7.1.3.4. Finalización de la prueba.....	50
7.1.3.4.1. Registro de resultados	50
7.1.3.5. Informe de ensayo	50
7.1.3.5.1. Identificación del ensayo	50
7.1.3.5.1.1. Equipo utilizado.....	50
7.1.3.5.1.2. Identificación de la muestra.....	51

7.1.3.5.1.3.	Preparación de la muestra.....	51
7.1.3.5.2.	Condiciones del ensayo	51
7.1.3.5.3.	Resultados del ensayo.....	51
7.1.3.5.4.	Análisis de datos	51
7.1.3.5.4.1.	Inspección post-prueba.....	51
7.1.3.5.4.2.	Modelo de presentación de curvas s-n.....	51
7.2.	ENSAYO DE FLEXIÓN ALTERNATIVA	52
7.2.1.	Forma y tamaño de la muestra.....	52
7.2.1.1.	Forma de la sección de prueba	52
7.2.1.2.	Dimensión de las muestras	53
7.2.2.	Preparación de las muestras.....	53
7.2.2.1.	General.....	53
7.2.2.2.	Marcado de la muestra.....	53
7.2.3.	Procedimiento de prueba	54
7.2.3.1.	Montaje de la muestra:	54
7.2.3.1.1.	Alineación adecuada:	54
7.2.3.1.2.	Dispositivos de sujeción:	54
7.2.3.1.3.	Precisión en el montaje:.....	54
7.2.3.1.4.	Montaje en la máquina:.....	55
7.2.3.1.5.	Verificación de la muestra:.....	55
7.2.3.2.	Aplicación de la fuerza	55
7.2.3.2.1.	Control de la fuerza:	55
7.2.3.2.2.	Registro de la fuerza:	56
7.2.3.2.2.1.	Medición de la fuerza:	56
7.2.3.2.3.	Relación carga esfuerzo:.....	57

7.2.3.2.4.	Elección de la fuerza a aplicar en el ensayo:	58
7.2.3.2.5.	Monitoreo de la prueba:	58
7.2.3.3.	Selección de la frecuencia:	58
7.2.3.3.1.	Importancia de la frecuencia:.....	58
7.2.3.3.1.1.	Representatividad de las condiciones reales:	59
7.2.3.3.1.2.	Minimización de efectos dinámicos:	59
7.2.3.3.1.3.	Duración de la prueba:.....	59
7.2.3.3.1.4.	Precisión y reproducibilidad:.....	59
7.2.3.3.2.	Factores que considerar	59
7.2.3.3.2.1.	Propiedades mecánicas de la muestra.....	59
7.2.3.3.2.2.	Sensibilidad a la temperatura.....	60
7.2.3.3.2.3.	Condiciones de prueba.....	60
7.2.3.3.2.4.	Durabilidad y vida útil:.....	60
7.2.3.3.2.5.	Capacidad del equipo de ensayo - precisión y estabilidad	60
7.2.3.3.2.6.	Limitaciones del equipo.....	60
7.2.3.3.3.	Dispositivo de selección de frecuencia	61
7.2.3.3.4.	Registro de la frecuencia.....	61
7.2.3.3.4.1.	Documentación.....	61
7.2.3.4.	Finalización de la prueba.....	62
7.2.3.4.1.	Registro de resultados	62
7.2.3.5.	Informe de ensayo	62
7.2.3.5.1.	Identificación del ensayo	62
7.2.3.5.1.1.	Equipo utilizado.....	62
7.2.3.5.1.2.	Identificación de la muestra.....	62
7.2.3.5.1.3.	Preparación de la muestra.....	62

7.2.3.5.2.	Condiciones del ensayo	63
7.2.3.5.3.	Resultados del ensayo	63
7.2.3.5.4.	Análisis de datos	63
7.2.3.5.4.1.	Inspección post-prueba	63
7.2.3.5.4.2.	Modelo de presentación de curvas s-n.....	63
7.3.	ENSAYO DE fatiga multiaxial.....	63
7.3.1.	Forma y tamaño de la muestra.....	63
7.3.1.1.	Forma de la sección de prueba	63
7.3.1.2.	Dimensión de las muestras	64
7.3.2.	Preparación de las muestras.....	65
7.3.2.1.	General.....	65
7.3.2.2.	Marcado de la muestra.....	65
7.3.3.	Procedimiento de prueba	65
7.3.3.1.	Montaje de la muestra:	65
7.3.3.1.1.	Alineación adecuada:	65
7.3.3.1.2.	Dispositivos de sujeción:	65
7.3.3.1.3.	Precisión en el montaje:	66
7.3.3.1.4.	Montaje en la máquina:.....	66
7.3.3.1.5.	Verificación de la muestra:.....	67
7.3.3.2.	Aplicación de la fuerza	67
7.3.3.2.1.	Control de la fuerza:	67
7.3.3.2.2.	Registro de la fuerza:	67
7.3.3.2.2.1.	Medición de la fuerza:	68
7.3.3.2.3.	Relación carga esfuerzo:	68
7.3.3.2.4.	Elección de la fuerza a aplicar en el ensayo:	69

7.3.3.2.5. Monitoreo de la prueba:	69
7.3.3.3. Selección de la frecuencia:	70
7.3.3.3.1. Importancia de la frecuencia:	70
7.3.3.3.1.1. Representatividad de las condiciones reales:	70
7.3.3.3.1.2. Minimización de efectos dinámicos:	70
7.3.3.3.1.3. Duración de la prueba:	70
7.3.3.3.1.4. Precisión y reproducibilidad:	70
7.3.3.3.2. Factores que considerar	71
7.3.3.3.2.1. Propiedades mecánicas de la muestra	71
7.3.3.3.2.2. Sensibilidad a la temperatura	71
7.3.3.3.2.3. Condiciones de prueba	71
7.3.3.3.2.4. Durabilidad y vida útil:	71
7.3.3.3.2.5. Capacidad del equipo de ensayo - precisión y estabilidad	71
7.3.3.3.2.6. Limitaciones del equipo	71
7.3.3.3.3. Dispositivo de selección de frecuencia	72
7.3.3.3.4. Registro de la frecuencia	72
7.3.3.3.4.1. Documentación	72
7.3.3.4. Finalización de la prueba	73
7.3.3.4.1. Registro de resultados	73
7.3.3.5. Informe de ensayo	73
7.3.3.5.1. Identificación del ensayo	73
7.3.3.5.1.1. Equipo utilizado	73
7.3.3.5.1.2. Identificación de la muestra	73
7.3.3.5.1.3. Preparación de la muestra	73
7.3.3.5.2. Condiciones del ensayo	74

7.3.3.5.3.	Resultados del ensayo.....	74
7.3.3.5.4.	Análisis de datos	74
7.3.3.5.4.1.	Inspección post-prueba.....	74
7.3.3.5.4.2.	Modelo de presentación de curvas s-n.....	74
7.3.3.5.4.3.	Ajuste con criterio de sines para aluminio.....	74
8.	FASE 5. LISTAR LA TERMINOLOGÍA NECESARIA PARA LA EJECUCIÓN Y COMPRESIÓN DETALLADA DEL DOCUMENTO DEL DESARROLLO DE LOS ENSAYOS	76
9.	FASE 6. Establecer las medidas mínimas de seguridad para el desarrollo de los ensayos por medio de un listado de normas de seguridad.....	78
9.1.	NORMAS DE SEGURIDAD EN LABORATORIOS ESCUELA INGENIERÍA MECÁNICA	78
9.1.1.	Indumentaria de laboratorio reglamentaria.....	78
9.1.2.	RIESGO ELÉCTRICO (RETIE (Resolución 40117 de 2024), 2024)	78
9.1.3.	Riesgo de atrapamiento	78
10.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	80
	RECOMENDACIONES.....	81
	Bibliografía.....	82

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Máquina de fatiga por flexión rotativa ARBM.....	26
Ilustración 2 Máquina de fatiga multiaxial Electroforce 9400	27
Ilustración 3 Fases del trabajo de investigación	28
Ilustración 9 Máquina de fatiga multiaxial.....	34
Ilustración 10 Bastidor máquina de fatiga multiaxial.....	34
Ilustración 11 sistema rotacional 1	35
Ilustración 12 Mecanismo reciprocante (8)	36
Ilustración 13 Sistema rotacional 2	37
Ilustración 14 mandriles de torno	38
Ilustración 15 plano elemento de sujeción	39
Ilustración 16 montaje probetas cilíndricas y planas.....	39
Ilustración 17 Muestra, Momento y cortante.....	41
Ilustración 18 Dispositivos de sujeción	43
Ilustración 19 Precisión en el montaje.....	43
Ilustración 20 Montaje en la máquina	44
Ilustración 21 Rueda excéntrica	44
Ilustración 22 Diagrama adquisición de datos.....	45
Ilustración 23 Curva de calibración con excitación de 10 V y 5V	45
Ilustración 24 Control de frecuencia para ensayo de flexión rotativa	49
Ilustración 27 Muestra flexión alternativa, Momento y cortante	52
Ilustración 28 Dispositivos de sujeción.....	54
Ilustración 29 Precisión en el montaje pieza plana.....	55
Ilustración 30 Montaje en la máquina de pieza plana	55
Ilustración 31 Rueda excéntrica	56
Ilustración 32 Diagrama adquisición de datos.....	56
Ilustración 33 Curva de calibración con excitación de 10 V y 5V	57
Ilustración 34 Control de frecuencia para ensayo de flexión alternativa	61
Ilustración 37 Muestra multiaxial.....	64
Ilustración 38 Dispositivos de sujeción	66
Ilustración 39 Precisión en el montaje.....	66

Ilustración 40 Montaje en la máquina	66
Ilustración 41 Rueda excéntrica	67
Ilustración 42 Diagrama adquisición de datos.....	67
Ilustración 43 Curva de calibración con excitación de 10 V y 5V	68
Ilustración 44 Control de frecuencia para ensayo de fatiga multiaxial	72

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Descripción técnica de máquina de fatiga por flexión rotativa	27
Tabla 2 Dimensiones de la muestra	41
Tabla 3 Registro carga y esfuerzo.....	47
Tabla 4 Registro de resultados.....	50
Tabla 5 Dimensiones de la muestra plana	53
Tabla 6 Registro carga y esfuerzo ensayo flexión alternativa	58
Tabla 7 Registro de resultados.....	62
Tabla 8 Dimensiones de la muestra	64
Tabla 9 Registro carga y esfuerzo.....	69
Tabla 10 Registro de resultados.....	73

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. DOCUMENTO GUÍA PARA NORMALIZACIÓN DE ENSAYO

Anexo B. PLANOS SUJETADOR DE PIEZAS DE ENSAYO

RESUMEN

TÍTULO: ESTRUCTURAR LOS LINEAMIENTOS PARA LA REALIZACIÓN DE LA NORMA DE ENSAYO DE FATIGA MULTIAXIAL. *

AUTOR: GERMAN ANDRES BEDOYA ARIZA, NICOLAY DAVID CAMARGO ARIAS**

PALABRAS CLAVE: multiaxial, flexión, fatiga.

DESCRIPCIÓN: La presente propuesta se enfocará en dar a conocer las distintas reglas de utilización de la máquina objeto de patente, por la Universidad Industrial de Santander, enfocando en principio su desempeño con base en las normas técnicas colombianas “Icontec”. La propuesta de estandarización permitirá a la Escuela de Ingeniería mecánica abrir un campo importante para la investigación de las propiedades mecánicas de múltiples materiales mediante el ensayo de fatiga multiaxial. Teniendo en cuenta este contexto, se contribuirá positivamente a la mejora de condiciones investigativas para la búsqueda de nuevos materiales que son de alta demanda en el campo ingenieril que satisfagan las necesidades de diseño en industrias como la aeronáutica, automotriz, entre otras;

A su vez se desea cumplir con los parámetros requeridos por norma Icontec para la implementación de ensayos de fatiga multiaxial creando puntos de equilibrio entre las ambiciones tecnológicas en el mundo de los materiales y las necesidades inmediatas, esto haciendo referencia a un ambiente de desarrollo ingenieril sostenible, que fortalezca escenarios de investigación progresivos, pero a su vez amigables con las condiciones ambientales, económicas y sociales.

* Trabajo de Grado

** Facultad de ingenierías físico-mecánicas. Escuela de ingeniería mecánica. Director: Alberto David Pertuz Comas. Phd

ABSTRACT

TITLE: ESTRUCTURAR LOS LINEAMIENTOS PARA LA REALIZACIÓN DE LA NORMA DE ENSAYO DE FATIGA MULTIAXIAL. *

AUTHOR: GERMAN ANDRES BEDOYA ARIZA, NICOLAY DAVID CAMARGO ARIAS**

KEY WORDS: multiaxial, flexion, fatigue

DESCRIPTION: The present proposal will focus on making known the different rules of use of the machine object of patent, by the Industrial University of Santander, focusing in principle on its performance based on the Colombian technical standards "Icontec". The standarization proposal allowed the School of Mechanical Engineering to open an important field for the investigation of multiple mechanical properties of materials through multiaxial fatigue testing. Considering this context, it contributes positively to the improvement of investigative conditions for the search for new materials that are in high demand in the engineering field that satisfy the design needs in industries such as aeronautics, automotive, and others.

At the same time, it is desired to comply with the parameters required by the Icontec standard for the implementation of multiaxial fatigue tests, creating balance points between technological ambitions in the world of materials and immediate needs, this referring to a sustainable engineering development environment, which strengthens progressive research scenarios, but at the same time friendly to environmental, economic, and social conditions.

*Degree Work

**Faculty of Physical–Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Advisor: Alberto David Pertuz Comas, PhD

INTRODUCCIÓN

El estudio del comportamiento a fatiga de materiales sometidos a tensiones multiaxiales es un campo en el que se han enfocado importantes esfuerzos de investigación en los últimos años. Sin embargo, sigue siendo un problema no resuelto, ya que continuamente aparecen nuevos métodos, adaptaciones y mejoras de los existentes.

De acuerdo con la norma **ISO/TR 12112** (ISO/TR 12112, 2012), se establece que los componentes estructurales en la industria suelen estar sujetos a algún tipo de esfuerzo multiaxial, y que las grietas generalmente se inician en superficies defectuosas o discontinuidades. Dichas grietas están influenciadas principalmente por el sistema de esfuerzos de superficie biaxial. Por esta razón, se hace indispensable contar con una **máquina para ensayos de fatiga multiaxial** (UIS Patente nº WO2018116092, 2016) como la que se encuentra en el laboratorio de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, que permita llevar a cabo ensayos controlados y reproducibles.

La existencia de este equipo y su originalidad crea la necesidad de un documento técnico que organice y resuma la información, sirviendo como **guía normativa y estandarizada para ensayos de fatiga multiaxial**, facilitando nuevas investigaciones de materiales y contribuyendo al desarrollo tecnológico y científico del área de la fatiga, la cual lleva más de 80 años en continua evolución y cuyos grandes aportes han permitido que más del 90% de los equipos rotativos industriales puedan diseñarse considerando su comportamiento a fatiga. En este contexto, al momento de realizar el estudio de los lineamientos necesarios para estructurar una guía normativa para pruebas de ensayo de fatiga multiaxial, se toma como referencia la norma técnica colombiana **NTC-2**. La importancia de esta norma radica en que establece procedimientos para evaluar la resistencia y ductilidad de los materiales metálicos sometidos a esfuerzos de tracción uniaxiales. (NTC -2, 1995) Esta información resulta útil para la comparación de materiales, el desarrollo de aleaciones, control de calidad y diseño bajo ciertos criterios de resistencia. Aunque estos métodos se consideran satisfactorios para los fines mencionados, en el caso de la fatiga multiaxial se requieren métodos más especializados que garanticen resultados representativos.

Finalmente, a partir de la recopilación de información y del análisis de la norma **ISO/TR 12112** (ISO/TR 12112, 2012) ,se consideran los conceptos de flexión rotativa, flexión alternada y fatiga multiaxial para proponer una guía que complemente el uso de la **máquina**

para fatiga multiaxial y establezca los lineamientos necesarios para estandarizar la utilización de esta en investigaciones futuras.

1. OBJETIVOS

1.1.OBJETIVO GENERAL

Generar un documento que establezca los requisitos mínimos para la realización de un ensayo de fatiga multiaxial. Además, que estructure los condicionados de la norma del ensayo.

1.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer la importancia del ensayo de fatiga multiaxial como una herramienta para el diseño en ingeniería mecánica mediante el establecimiento de las ecuaciones de cargas multiaxiales de flexión alternativa y flexión rotativa.
- Detallar las funciones de los componentes de la máquina de fatiga multiaxial y los controles de esta, los cuales son necesarios para un ensayo de fatiga multiaxial mediante el listado de sus componentes y su función.
- Especificar los dispositivos de agarre de las muestras de acuerdo con el tipo de material que se desea caracterizar.
- Documentar el procedimiento para la realización de un ensayo de flexión rotativa, flexión alternativa y fatiga multiaxial, mediante la descripción de las sollicitaciones mecánicas.
- Listar la terminología necesaria para la ejecución y comprensión detallada del documento del desarrollo de los ensayos.
- Establecer las medidas mínimas de seguridad para el desarrollo de los ensayos por medio de un listado de normas de seguridad.

2. MARCO REFERENCIAL

2.1.MARCO DE ANTECEDENTES

Se da a conocer la revisión de trabajos de grado que han sido desarrollados previamente y están relacionados con la máquina de fatiga multiaxial que está en la Universidad Industrial de Santander en la escuela de Ingeniería mecánica, además de las investigaciones realizadas para la creación de instructivos de pruebas con base en las respectivas normas.

Tomando en consideración, que la temática principal del presente proyecto está relacionada con la creación de una guía para pruebas de ensayo materiales sometidos a flexión rotativa, flexión alternativa, y fatiga multiaxial.

Los proyectos que se toman en consideración para su respectiva verificación son los asociados a las investigaciones realizadas en diferentes escuelas de la Universidad Industrial de Santander los cuales han realizado estudios de ensayos de fatiga multiaxial y creación de instructivos para pruebas con base en diferentes normas.

Autor: Michael Oliveros.

Título: “Reingeniería del funcionamiento de máquina de fatiga multiaxial y obtención de una curva multiaxial (S vs N) de un aluminio de pureza comercial”.

Objetivo: Optimizar el funcionamiento y puesta en marcha de la máquina de fatiga multiaxial y comprobar su desempeño con una curva S vs N para un aluminio de pureza comercial.

El proyecto realiza múltiples pruebas de fatiga multiaxial con la máquina en condiciones óptimas, a un aluminio comercial con el fin de conocer su curva S-N bajo las condiciones de trabajo escogidas, teniendo en cuenta la fabricación de probetas con respecto a las normativas

existentes y determinación de una metodología adecuada para el tratamiento de los datos obtenidos.

Autores: John Bautista, Jorge Villegas.

Título: “Instructivos para pruebas tan δ bajo la tecnología VLF (very low frequency) y pruebas hipot en DC y VLF, para cables eléctricos de MT (media tensión), máquinas rotativas y transformadores, con base en algunas normas IEEE”.

Objetivo: Documentar un procedimiento a manera de instructivo que sirva de base teórico-práctica para realizar pruebas TAN δ en VLF y pruebas HIPOT tanto en DC como en VLF, a cables eléctricos de MT, máquinas rotativas y transformadores, basados en los requerimientos estipulados en algunas normas IEEE.

El documento es elaborado como una base de capacitación a personal en pruebas eléctricas con inyectores de alta tensión y está redactado en español para facilitar su seguimiento. La información descrita, permite realizar un seguimiento detallado del progreso de la prueba y garantizar la calidad de esta.

2.2.MARCO TEÓRICO

Descripción de la técnica

Una prueba de fatiga consiste en someter a una probeta a esfuerzos cíclicos o variables y registrar el número de ciclos que soporta hasta la falla, con el objetivo de caracterizar la resistencia a fatiga del material (ASTM E466-21, 2021).

La falla por fatiga se desarrolla a partir de tres etapas (I, II y III): La etapa I es la nucleación por movimiento de dislocaciones, seguida de propagación cristalográfica que se extiende de dos a cinco granos alrededor del origen. Normalmente, las grietas de la etapa I no pueden verse a simple vista.

En la etapa II las microgrietas se convierten en macrogrietas y forman superficies paralelas en forma de mesetas separadas por crestas longitudinales. Por lo general, las mesetas son suaves y normales a la dirección del esfuerzo máximo en tensión. Estas superficies pueden tener marcas oscuras y claras conocidas como marcas de playa, o marcas de concha. Durante las cargas cíclicas, estas superficies con grietas se abren y cierran, frotándose entre sí. La aparición de las marcas de playa depende de los cambios en el nivel de la frecuencia de carga y la naturaleza corrosiva del entorno.

Por otro lado, en la Etapa III o fase final del ciclo de fatiga el material remanente ya no puede soportar las cargas aplicadas, produciéndose una fractura súbita y rápida. Esta fractura puede manifestarse como frágil, dúctil o una combinación de ambas modalidades (Ritchie, 1999) . En el presente caso la fatiga es aplicada a flexión rotativa y flexión alternativa por la máquina.

La flexión rotativa consiste en aplicar una carga sobre un elemento que se encuentra sometido a una rotación; el giro causa que las fibras que se encuentran inicialmente a flexión pasan a estar a compresión y las fibras que están en la parte inferior a compresión, pasan a estar a flexión. Además de esto, el elemento se encuentra sometido a esfuerzos de torsión acompañado de los esfuerzos anteriormente mencionados. Los movimientos repetitivos causan en el elemento fisuras que incrementan su tamaño gradualmente hasta que se hace inminente la fractura.

La flexión alternante consiste en someter un elemento estructural a esfuerzos cíclicos de tensión y compresión sobre y debajo de la línea neutra del material, lo que puede provocar falla por fatiga incluso a niveles de esfuerzo inferiores al límite de fluencia estática (Ritchie, 1999).

2.2.1. Métodos de prueba de fatiga multiaxial (ISO/TR 12112, 2012)

Esta fue la primera técnica utilizada para aplicar tensiones combinadas en fatiga de ciclo alto (HCF) a temperatura ambiente. Se aplicaron fuerzas verticales oscilantes a una muestra cilíndrica sujeta horizontalmente que podría girarse hasta 90° en el plano horizontal para introducir flexión, flexión + torsión, o torsión en la sección central entallada. Las muestras

eran sólidas o huecas. Un número de estas máquinas de prueba electromecánicas se construyeron entre 1930 y 1950 para investigar la fatiga de aceros para motores aeronáuticos, especialmente para aplicaciones de cigüeñal

2.2.1.1. Axial + torsión (ISO/TR 12112, 2012)

Esta técnica popular emplea un diseño tubular único con una longitud de calibre sobre la cual la tensión y la deformación son sustancialmente invariables para la medición de la presión y el monitoreo de grietas.

Las principales direcciones de tensión y deformación rotan progresivamente 45

° a medida que la prueba se mueve de uniaxial a torsión.

2.2.1.2. Axial + presión interna (ISO/TR 12112, 2012)

Un método que se ha utilizado para estudiar los efectos de la biaxialidad en la resistencia a la fatiga de larga duración es someter los tubos de paredes delgadas a una presión interna repetida y una carga final que está en fase con una presión y una función lineal de la misma. Este enfoque permite un diseño tubular único con tensión y deformación esencialmente invariables sobre la longitud del calibre.

Los estudios de grietas son difíciles ya que la tensión máxima se produce en el orificio, por lo que las grietas solo pueden ser visibles después de la penetración en la pared poco antes de la falla.

2.2.1.3. Axial + presión interna + presión externa (ISO/TR 12112, 2012)

Según Ellison E.G., & Andrews J.M.H. “En el régimen de fatiga biaxial de alta tensión existe una escasez de datos y, en consecuencia, de información sobre métodos de predicción de dicho comportamiento a partir de pruebas uniaxiales más simples”.

Llevan a cabo una investigación sobre la aleación de aluminio RR58 en forma de muestras cilíndricas sometidas a carga axial de tracción / compresión y presiones internas / externas a temperatura ambiente y 140 ° C.

Este diseño permite un ciclo completamente inverso sin trinquete porque se puede aplicar compresión radial.

Las tensiones y presiones axiales y circunferenciales son medibles, lo que permite bucles de histéresis LCF en ambos ejes de superficie, lo que hace que el enfoque sea adecuado para estudios conductuales fundamentales.

2.2.1.4. Axial + presión interna + presión externa + torsión (ISO/TR 12112, 2012)

La adición de torsión introduce la rotación de los ejes principales de tensión o deformación que permite, en principio, investigar la anisotropía del material y los efectos de las diferentes simetrías (en las direcciones axial y circunferencial).

2.2.1.5. Cruciform — lcf (ISO/TR 12112, 2012)

Cuatro brazos de carga ortogonales aplican tensión biaxial a un área central de calibre circular en la muestra.

Esta área generalmente está empotrada esféricamente en ambos lados para resistir el pandeo y asegurar que las grietas se inicien cerca del centro.

En consecuencia, el área del medidor no admite todas las fuerzas aplicadas, es decir, parte de la fuerza se desvía alrededor del exterior. Como resultado, las tensiones y las deformaciones plásticas no son fácilmente determinables. Sin embargo, la observación visual del desarrollo de grietas por fatiga es sencilla y las pruebas de temperatura elevada, incluido TMF, se pueden lograr fácilmente.

2.2.2. Normas técnicas

La palabra norma procede del latín normum y significa “regla a seguir para llegar a un fin determinado”. Por normalizar se entiende, en general, simplificar, unificar o especificar. Desde la unificación y la imposición en última instancia que supuso el sistema métrico decimal en su momento, hasta las normas ambientales más recientes, ha transcurrido mucho tiempo. Sin embargo, la definición continúa siendo válida y permaneciendo invariable en su propósito. Puede afirmarse, no obstante, que los campos de aplicación de la normalización han ido variando con el paso del tiempo, abarcando nuevas materias y temas. Pero pese a los

vaivenes históricos experimentados, los saltos, las paradas, las aceleraciones, o el mantenimiento y convivencia de normativas técnicas diferentes, de patrones y unidades distintos hasta nuestros días, la normalización continúa extendiéndose a nuevos campos y experimentando una evolución imparable. Una norma es, por definición, un documento que contiene una especificación técnica basada en la experiencia, la ciencia y el desarrollo tecnológico, cuya observancia no es obligatoria y que surge como resultado del consenso entre las partes interesadas e involucradas en la actividad objeto de la misma como fabricantes, Administración, consumidores, laboratorios y centros de investigación. Y debe estar aprobada por un organismo de normalización reconocido. De hecho, las normas se identifican mediante un código que consta de unos caracteres que indican su procedencia, generalmente con el acrónimo del organismo normalizador que las emite, seguido por un número identificativo, el año de su creación y su título. La normalización presenta numerosas ventajas para las partes implicadas. Los fabricantes consiguen con ella racionalizar las variedades y los tipos de productos. Sirve para mejorar la gestión y el diseño contribuyendo a la disminución del volumen de las existencias y de los costes de producción. Además, simplifica la gestión de compras, agiliza los pedidos y facilita la comercialización. En cuanto a los consumidores, las ventajas que ofrece son, sobre todo, permitir contar con información sobre las características del producto, proporcionar niveles de seguridad y de calidad en cuanto a bienes y servicios facilitando, además, la comparación entre las distintas opciones disponibles. Para la Administración resulta importante, ya que facilita el comercio y contribuye al desarrollo de la economía, establece políticas de seguridad, calidad y medio ambiente, por lo que facilita la simplificación de los textos legales. El hecho normalizador se constituye en una herramienta destinada a facilitar la intercambiabilidad, en un instrumento adecuado para proporcionar el lenguaje común necesario y objetivo que permita el intercambio. Las vertientes implicadas en los procesos normalizadores a lo largo de la historia han sido y continúan siendo tecnológicas, legales, sociológicas, económicas, de salud y seguridad, medioambientales, comerciales y políticas.

2.2.3. Equipos utilizados comercialmente para pruebas de fatiga multiaxial.

2.2.3.1. Máquina de fatiga por flexión rotativa arbm

La máquina de fatiga por flexión rotativa se puede emplear en distintos sectores o ámbitos, como el ferroviario, el energético, de automoción, el aeronáutico o el universitario para realizar ensayos de fatiga por flexión rotativa (Roell, 2021).



Ilustración 1 Máquina de fatiga por flexión rotativa ARBM

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
Máquina principal		
Velocidad regulable	500...5000	1/min
Peso total	690	kg
Área de ensayo		
Longitud de sujeción, ensayo a temp. ambiente	50...200	mm
Longitud de sujeción, ensayo a altas temperaturas	160...200	mm
Peso de carga		
Pesos	(1x 1N; 2x2N; 1x5 N; 2x 10N; 1x 20N; 1x 50 N; 2 x 100N) x2 cajas	
Material	Acero inoxidable, densidad: 7.9 g/cm ³ , G=9.80665 N/kg	
Envasado	Peso neto: (30.5 Kg; peso bruto 34.5 kg) x 2 cajas	
Conexión de red		
Tensión de entrada	3x 380/400 V +PE + N, 50/60 Hz.	
Corriente	16	A
Potencia	Sin horno 0.75, con horno 2	kW

2.2.3.2. Máquina de fatiga multiaxial electroforce 9400

Las arterias periféricas tienen más movimientos de flexión, torsión y estiramiento que las arterias coronarias, por lo que las endoprótesis colocadas en arterias periféricas sufrirán más tensión y presión. Desarrollamos el instrumento de prueba de endoprótesis periféricas multiaxial (MAPS, Multi-Axis Peripheral Stent) ElectroForce 9400 para las aplicaciones de endoprótesis en arterias periféricas. Este instrumento programable simula la carga compleja que las endoprótesis experimentan en las arterias periféricas. Estas incluyen las arterias renales, las arterias carótidas y las arterias femorales-poplíteas (Industry, 2020).



Ilustración 2 Máquina de fatiga multiaxial Electroforce 9400

3. DISEÑO METODOLÓGICO

En el presente proyecto se plantearon 6 fases metodológicas de investigación, las cuales se extrajeron de cada uno de los objetivos planteados y de esta manera se plasmaron en el siguiente diagrama:

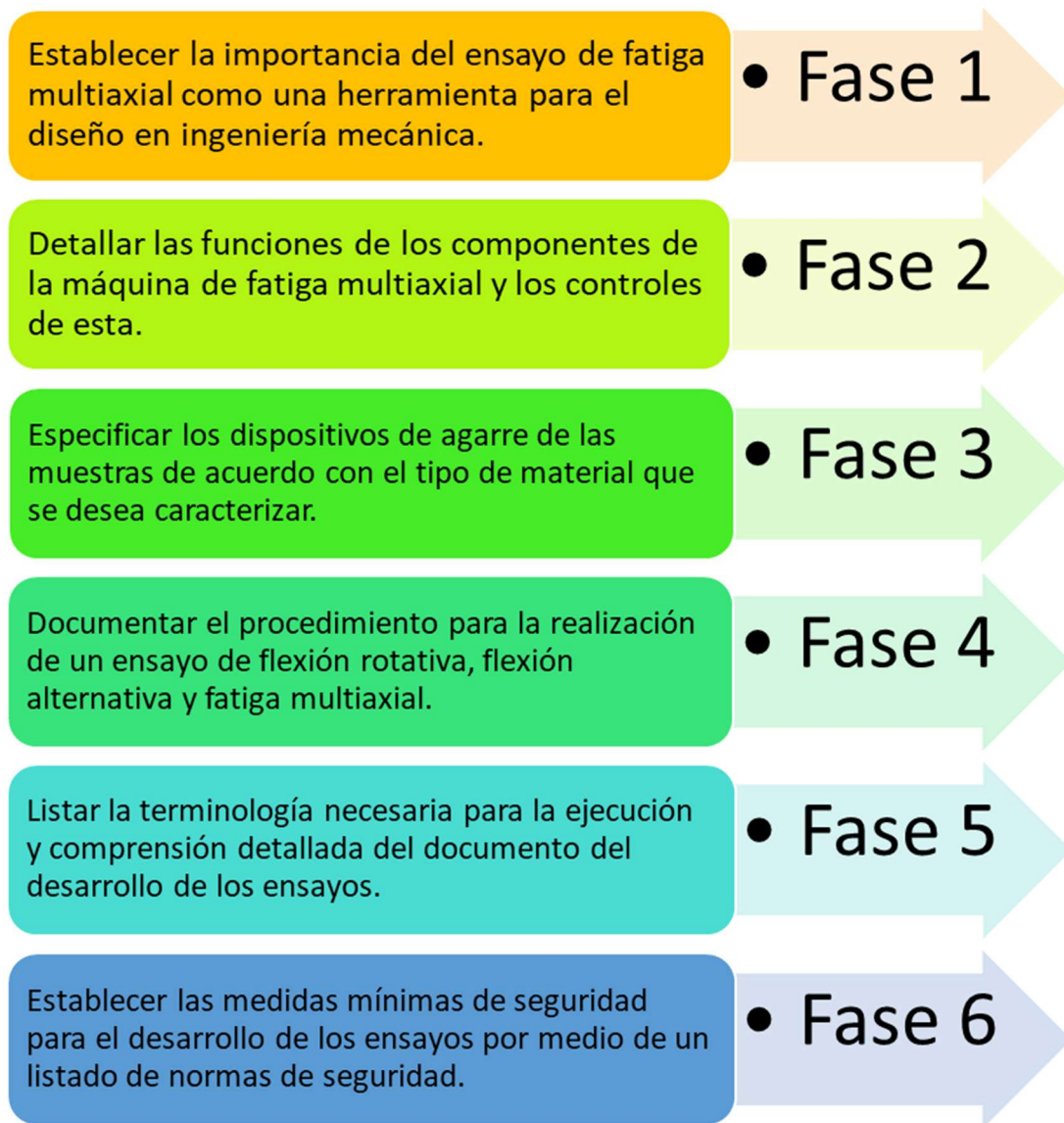


Ilustración 3 Fases del trabajo de investigación

4. FASE 1: IMPORTANCIA DEL ENSAYO DE FATIGA MULTIAXIAL.

La evaluación precisa de la durabilidad de componentes mecánicos sometidos a cargas cíclicas es un aspecto crítico en el diseño de ingeniería mecánica. En aplicaciones reales, componentes como ejes, estructuras de vehículos, aeronaves y recipientes a presión operan bajo estados de tensión multiaxial, donde las sollicitaciones varían en magnitud, dirección y fase de manera simultánea. Estos estados de carga complejos son predominantes en

operación, contrastando con las condiciones simplificadas de los ensayos uniaxiales (tracción-compresión). La extrapolación de datos uniaxiales para predecir la vida a fatiga en condiciones multiaxiales puede generar estimaciones imprecisas, a menudo no conservadoras, que comprometen la seguridad y fiabilidad de los diseños. Por ello, los ensayos de fatiga multiaxial se posicionan como una herramienta experimental esencial para caracterizar el comportamiento de materiales y validar modelos predictivos en el diseño estructural.

Los ensayos de fatiga multiaxial permiten reproducir condiciones de carga que reflejan fielmente los estados de tensión y deformación encontrados en componentes en servicio. Estos ensayos evalúan la interacción entre las componentes del tensor de esfuerzos o deformaciones, proporcionando información crítica sobre la resistencia a la fatiga, la nucleación de grietas y su propagación bajo cargas combinadas, como tracción-torsión o estados biaxiales. Los datos generados, representados en curvas de vida a fatiga multiaxiales (p. ej., S-N o ϵ -N), constituyen una base experimental robusta que supera las limitaciones de los ensayos uniaxiales, permitiendo una caracterización más precisa del comportamiento del material bajo sollicitaciones complejas.

Los resultados de los ensayos de fatiga multiaxial son fundamentales para la calibración y validación de criterios de falla por fatiga multiaxial, tales como los basados en energía, el plano crítico o esfuerzos/deformaciones equivalentes. Estos criterios se integran en herramientas de simulación numérica, como el Análisis por Elementos Finitos (FEA), para estimar la vida útil de componentes durante la fase de diseño. La fiabilidad de estas predicciones depende de la capacidad de los modelos para representar el comportamiento físico real, lo cual solo puede garantizarse mediante la comparación con datos experimentales obtenidos en condiciones multiaxiales controladas. Sin esta validación, los modelos predictivos carecen de fundamento empírico, aumentando la incertidumbre en las estimaciones de durabilidad.

Finalmente, la implementación del conocimiento derivado de los ensayos de fatiga multiaxial impacta directamente en la calidad y optimización del diseño en ingeniería. Comprender los mecanismos de falla específicos bajo cargas complejas y disponer de modelos predictivos

validados permite a los ingenieros tomar decisiones más informadas sobre la selección de materiales, el dimensionamiento de componentes y la optimización geométrica para mitigar concentraciones de esfuerzos perjudiciales. Esto se traduce en diseños que no solo cumplen los requisitos de seguridad y fiabilidad de manera más certera, sino que también abren la puerta a optimizaciones en peso y costo, al reducir la necesidad de factores de seguridad excesivamente amplios derivados de la incertidumbre asociada a análisis simplificados. En esencia, el ensayo de fatiga multiaxial es un puente indispensable entre la teoría y la práctica, asegurando la integridad estructural de componentes que operan en el complejo entorno de cargas del mundo real.

Criterio de Findley (Findley, 1959)

El criterio de Findley, basado en el concepto de plano crítico, establece que la iniciación de grietas por fatiga multiaxial ocurre en el plano donde el esfuerzo cortante alternante alcanza su valor máximo, modificado por una componente de esfuerzo normal máximo en dicho plano. Su formulación considera la influencia conjunta del cortante cíclico y la tracción normal, lo que permite capturar el efecto de apertura de grieta bajo cargas combinadas. Es especialmente útil para materiales dúctiles sometidos a cargas proporcionales y se expresa comúnmente como:

$$\tau_a + k * \sigma_n^{max} = C$$

Donde:

τ_a = *esfuerzo cortante alternante en el plano crítico.*

σ_n^{max} = *esfuerzo normal máximo en ese plano.*

k = *parámetro material que representa la sensibilidad a la tracción normal.*

C = *constante material relacionada con la resistencia a la fatiga.*

Criterio de Susmel & Lazzarin (Hu, 2019)

El criterio de Susmel y Lazzarin se basa en la evaluación de la densidad de energía de deformación media (W_{medio}) en un volumen de control alrededor del punto más solicitado.

Considera que la fatiga se inicia cuando esta densidad de energía supera un valor umbral, relacionado con la vida útil del componente. Su principal ventaja es que tiene en cuenta el efecto de gradientes de tensión en presencia de entallas o geometrías complejas, y puede aplicarse tanto a cargas proporcionales como no proporcionales.

$$W_{medio} = f(N_f)$$

Donde:

W_{medio} = es la densidad de energía de deformación media en un volumen de control

$f(N_f)$ = es una función relacionada con la vida a fatiga

Criterio de Sines (Sines, 1959)

El criterio de Sines es un enfoque multiaxial para la predicción de la fatiga de alto ciclo, que establece que la falla por fatiga ocurre cuando la energía de distorsión acumulada en el material alcanza un valor crítico. Este criterio considera la combinación de esfuerzos alternantes y esfuerzos medios, reflejando la influencia de la tracción normal sobre la resistencia a la fatiga. Su formulación se expresa comúnmente como

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1 * \sigma_2 - \sigma_2 * \sigma_3 - \sigma_3 * \sigma_1} \quad \text{Ec 7}$$

σ_{eq} : Tensión equivalente.

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: Tensiones principales en el material

Criterio de Crossland (Crossland, 1956)

El Criterio de Crossland es un modelo multiaxial de fallo por fatiga utilizado para predecir la vida útil en fatiga de alto ciclo (FAC) bajo cargas proporcionales. Considera tanto los esfuerzos cortantes alternantes como los esfuerzos hidrostáticos, que influyen en la resistencia a la fatiga. A continuación, se presenta una explicación estructurada:

$$\tau_{oct,a} + K * \sigma_{H,max} = C$$

$\tau_{oct,a}$: Amplitud de la tensión cortante octaédrica

$\sigma_{H,max}$: Tensión máxima

K,C: Constantes del material

$$\tau_{oct,a} = \frac{1}{3} \sqrt{(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_2)^2 + (\Delta\sigma_2 - \Delta\sigma_3)^2 + (\Delta\sigma_3 - \Delta\sigma_1)^2}$$
$$\sigma_{H,max} = \frac{1}{3} (\sigma_{1,max} + \sigma_{2,max} + \sigma_{3,max})$$

Criterios Basados en Energía:

Los criterios basados en energía para la fatiga asumen que el daño acumulado en un material está directamente relacionado con la energía disipada o almacenada por ciclo de carga. Bajo esta perspectiva, la falla por fatiga ocurre cuando la energía acumulada alcanza un valor crítico característico del material. Este enfoque permite integrar tanto los efectos de esfuerzos alternantes como de esfuerzos medios, y es especialmente útil en análisis de fatiga multiaxial y en componentes con geometrías complejas o concentradores de esfuerzo (Susmel, 2019)

Parámetro de Smith-Watson-Topper (SWT): (Smith, 1970) El parámetro de Smith-Watson-Topper (SWT) fue originalmente propuesto para la fatiga uniaxial considerando los efectos de tensión media. Sin embargo, su uso se ha extendido a condiciones multiaxiales aplicándolo en un plano crítico, generalmente el plano de máxima deformación principal. Este parámetro combina el esfuerzo máximo y la deformación alternante para predecir la vida a fatiga de manera más precisa en presencia de tensiones medias, y se expresa comúnmente como:

$$DP_{SWT} = \sigma_{n,max} * \frac{\Delta\epsilon_1}{2}$$

$\sigma_{n,max}$: Tensión normal máxima en el plano.

$\frac{\Delta\epsilon_1}{2}$: Amplitud de la deformación principal en ese plano

Criterios de Densidad de Energía de Deformación (SED):

Los criterios basados en la densidad de energía de deformación (Strain Energy Density, SED) proponen que el daño por fatiga es proporcional a la energía de deformación acumulada por ciclo. Esta energía puede considerarse como la energía de deformación plástica o la energía de deformación total, dependiendo del enfoque y del material.

Entre los ejemplos más conocidos se encuentran los parámetros propuestos por **Glinka** (Glinka, 1989) y **Ellyin** (Ellyin, 1997), los cuales relacionan la densidad de energía de deformación con la vida a fatiga de componentes sometidos a cargas multiaxiales y geometrías complejas. La formulación general puede expresarse como:

$$\Delta W_p = \oint \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}^p$$

$$\Delta W_t = \oint \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}$$

ΔW_p : Energía plástica por ciclo

ΔW_t : Energía total por ciclo

La diversidad de criterios desarrollados para evaluar la fatiga multiaxial ya sean basados en tensiones, deformaciones, energía o planos críticos; refleja la complejidad inherente de este fenómeno y la necesidad de abordarlo desde múltiples enfoques. Cada criterio aporta herramientas específicas para predecir la vida útil bajo diferentes combinaciones de carga, lo que evidencia que no existe un enfoque universalmente aplicable. Sin embargo, todos coinciden en un punto esencial: la necesidad de contar con datos experimentales fiables, obtenidos en condiciones multiaxiales controladas, que permitan su correcta calibración y validación. En este sentido, la normalización de los ensayos de fatiga multiaxial no solo es deseable, sino necesaria, para proporcionar una base común que permita comparar resultados, desarrollar modelos predictivos más robustos y, en última instancia, diseñar componentes más seguros y eficientes.

5. FASE 2: COMPONENTES DE LA MÁQUINA DE FATIGA MULTIAXIAL

5.1. MÁQUINA DE FATIGA MULTIAXIAL (UIS PATENTE N° WO2018116092, 2016)

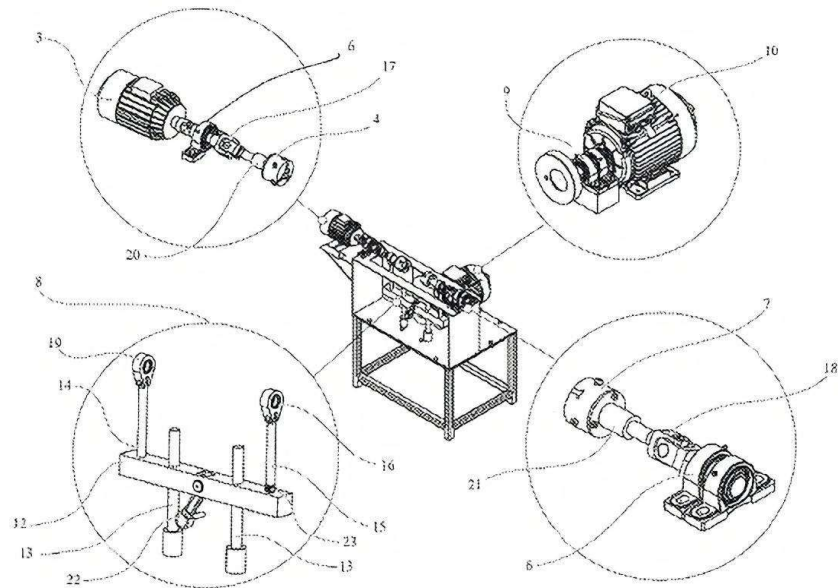


Ilustración 4 Máquina de fatiga multiaxial

La máquina está dividida en diferentes subconjuntos:

5.2. BASTIDOR

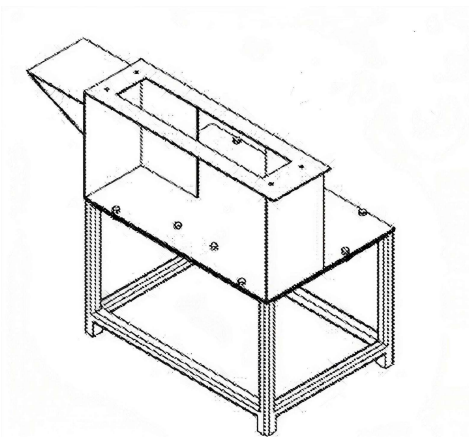


Ilustración 5 Bastidor máquina de fatiga multiaxial

Estructura formada por largueros y travesaños en la cual deben ir sujetas las partes de la máquina como motores, sistemas de sujeción, entre otros.

La mesa del bastidor cumple la función de apoyar el bastidor y facilitar su desplazamiento en el espacio que se requiera. Cuenta con unos niveladores para ajustar el nivel de la máquina

y que esta se encuentre en una posición completamente horizontal. Así mismo, la estructura debe estar soportada sobre una superficie apropiada que permita disminuir las vibraciones y cargas de funcionamiento. En una modalidad no ilustrada de la invención, la mesa se acopla a un mortero de concreto para disminuir vibraciones.

En una modalidad de la invención no ilustrada, el bastidor cuenta con un sistema de acople a la mesa, que cuenta con un sistema de amortiguamiento que disminuye las vibraciones y evita variaciones en la medición.

En una modalidad de la invención no ilustrada, el bastidor contiene alojamientos para los cojinetes fijos (6) que permitan fijarlos y que al mismo tiempo posibiliten la alineación del eje de potencia (2) y conducido (5) entre sí.

5.3. SISTEMA ROTACIONAL 1

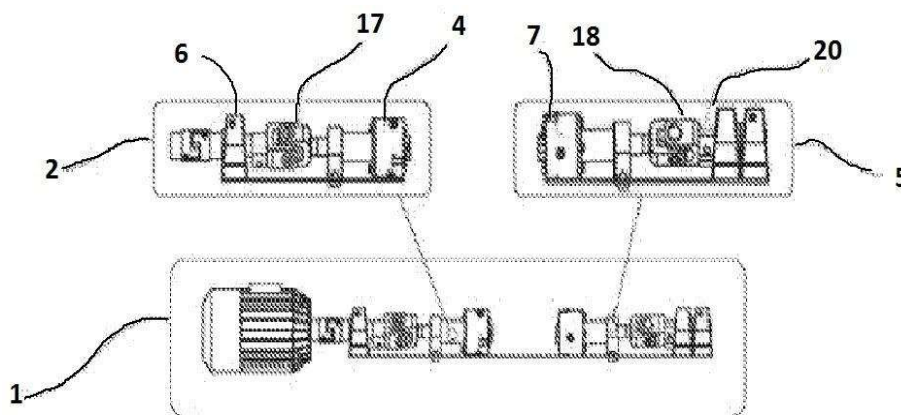


Ilustración 6 sistema rotacional 1

Subconjunto formado por un eje de transmisión de potencia (2) y un eje conducido (5), el eje (2) en uno de sus extremos se conecta al motor (3) mediante un elemento de acople (17) que consiste en una junta universal unida a un acoplamiento de motor.

El primer extremo del eje de potencia (2) descansa sobre un cojinete (6) ubicado entre el motor y el elemento de acoplamiento (17), este cojinete corresponde a una chumacera de bolas, la cual presenta la ventaja de que el ajuste que tiene la pista interna de la chumacera se acopla al eje con un prisionero, lo cual facilita su mantenimiento, recambio e instalación.

En el otro extremo está conectado a un primer elemento de sujeción (4), el cual permite sujetar la probeta o elemento de prueba sometido al ensayo.

El eje conducido (5) tiene un primer extremo (20) que descansa sobre un cojinete, un segundo extremo conectado a un segundo elemento de sujeción (7), donde el segundo elemento de sujeción (7) se encuentra dispuesto colinealmente con el primer elemento de sujeción (4). los dos extremos del eje (5) están unidos mediante un segundo elemento de acople (18).

5.4. MECANISMO RECIPROCANTE (8)

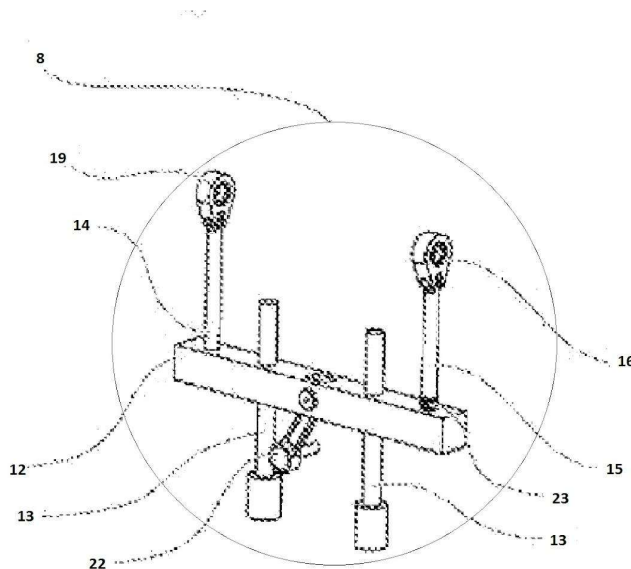


Ilustración 7 Mecanismo reciprocante (8)

El cual está formado por un elemento alternante (12) conectado al mecanismo oscilatorio (22), este elemento alternante se mueve con respecto a dos guías de desplazamiento (13) que permiten un movimiento lineal.

Al elemento alternante se conectan los extremos de dos brazos (14) y (15), El segundo extremo de los brazos están conectados a los cojinetes móviles (16) y (19), el cojinete (19) está conectado a eje de potencia (2) y el cojinete (16) está conectado al eje conducido (5).

5.5. SISTEMA ROTACIONAL 2

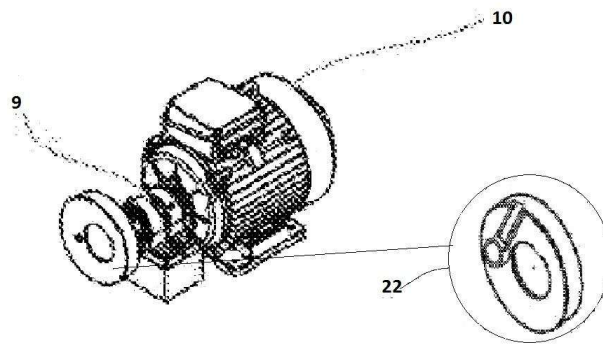


Ilustración 8 Sistema rotacional 2

El sistema de flexión alternativa cuenta con un segundo motor (3), el cual se conecta a un segundo eje de transmisión de potencia (9). el eje de potencia (9) descansa sobre cojinetes que están sujetos al bastidor.

En el segundo extremo del eje (9) está conectado a un mecanismo de oscilación (22) el cual es un mecanismo biela-manivela.

La máquina utiliza un primer motor (3) y un segundo motor (10) que funcionan de forma independiente. Cuando los dos motores (3 y 10) trabajan juntos, la máquina puede realizar pruebas de fatiga multiaxiales en una muestra.

Por otro lado, cuando los motores alternan en su encendido, la máquina es capaz de someter una muestra a flexión rotacional o flexión alternativa de forma independiente.

6. FASE 3: DISPOSITIVOS DE AGARRE DE LAS MUESTRAS DE ACUERDO CON EL TIPO DE MATERIAL QUE SE DESEA CARACTERIZAR

Los mandriles de torneado se utilizan para sujetar con precisión una pieza de trabajo en un torno o en un dispositivo de indexación para operaciones de fresado.[10]

Este tipo de herramienta fue adaptado a La máquina de fatiga multiaxial la cual está equipada con dos elementos de sujeción (4 y 7), estos mandriles proporcionan un medio satisfactorio de agarre para los dispositivos de sujeción de las probetas.

los mandriles tienen un diámetro exterior de 80 mm y un diámetro de sujeción óptimo de $\frac{5}{8}$ " según las dimensiones de las probetas de ensayo.

Los mandriles de torno manuales abren o cierran las mordazas con un tornillo o piñón

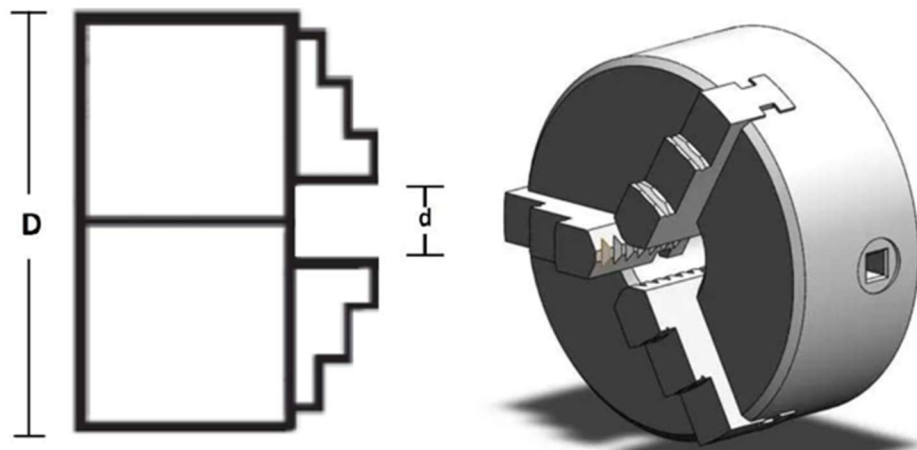


Ilustración 9 mandriles de torno

D=80 mm

d= $\frac{5}{8}$ "

6.1. ELEMENTOS DE SUJECIÓN

Dispositivo diseñado para poder sujetar piezas de diferente geometría, cilíndrica o plana sin necesidad de cambiar los mandriles.

Las piezas son aseguradas con 4 tornillos Bristol de precisión por cada elemento de sujeción, los cuales permiten un ajuste firme de la pieza ya sea cilíndrica o plana.

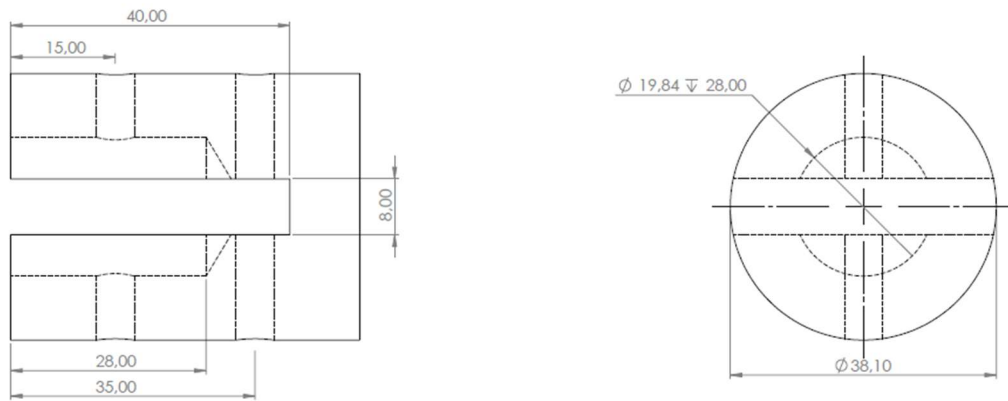


Ilustración 10 plano elemento de sujeción

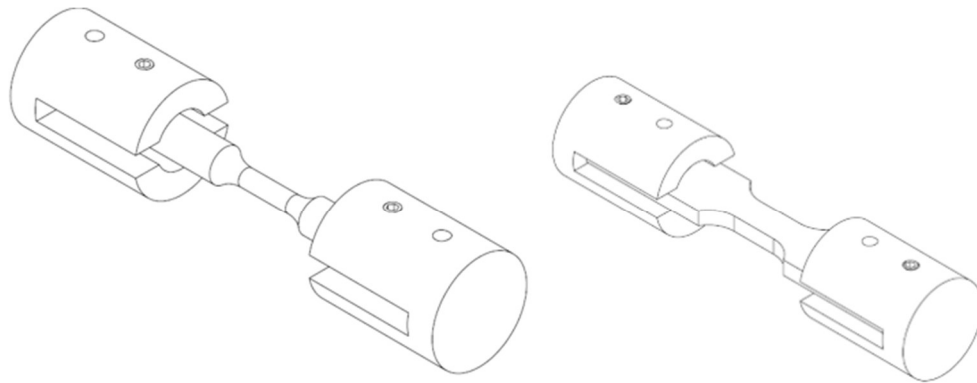


Ilustración 11 montaje probetas cilíndricas y planas

7. FASE 4: DOCUMENTAR EL PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE UN ENSAYO DE FLEXIÓN ROTATIVA, FLEXIÓN ALTERNATIVA Y FATIGA MULTIAXIAL

7.1. ENSAYO DE FLEXIÓN ROTATIVA

7.1.1. Forma y tamaño de la muestra.

7.1.1.1. Forma de la sección de prueba

Muestra para fatiga por flexión rotativa de sección de prueba de calibre uniforme. Adaptado de: ASTM E 606: Standard practice for strain-controlled fatigue testing. Annual Book of ASTM Standards, 1998, vol 3.

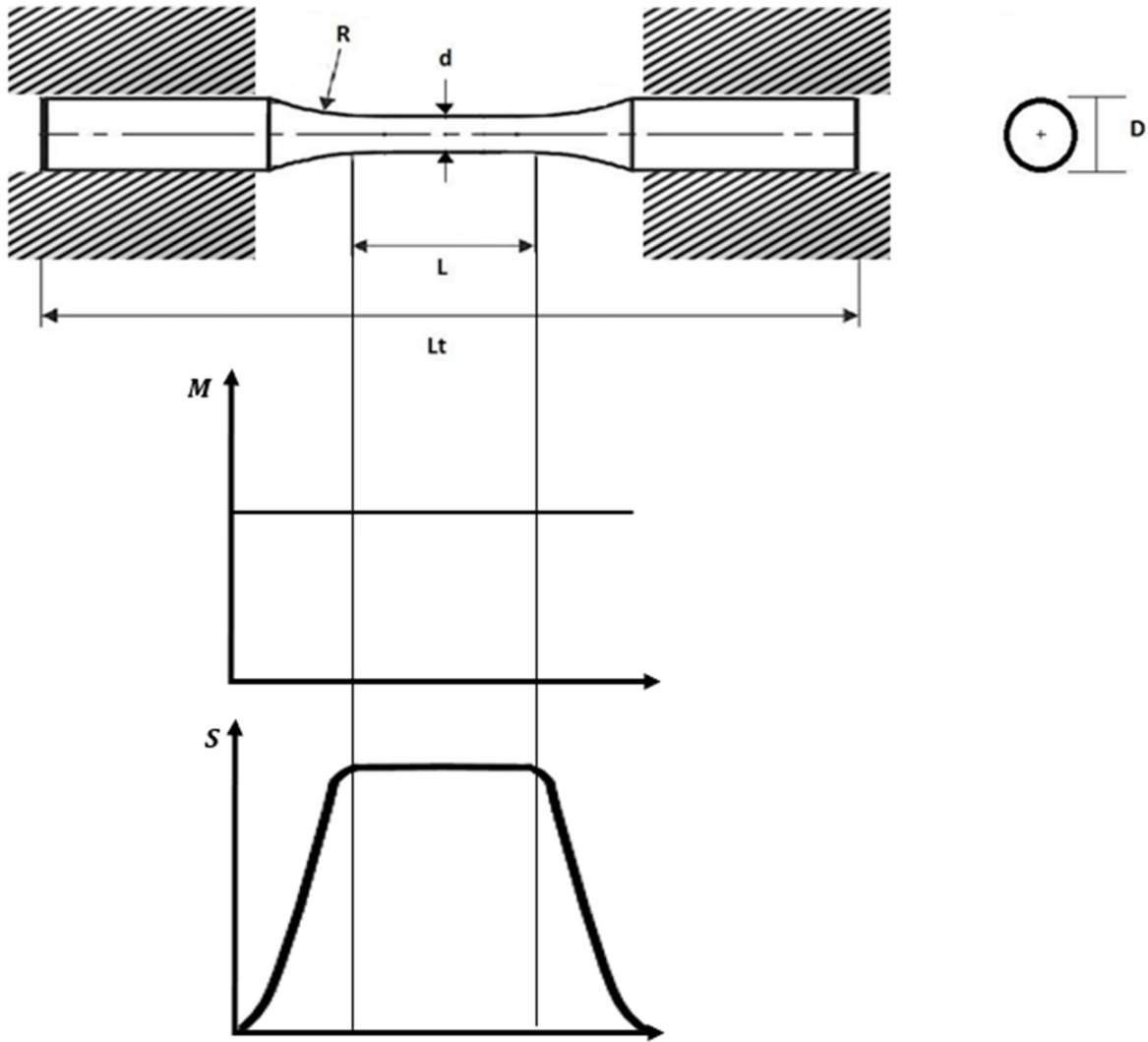


Ilustración 12 Muestra, Momento y cortante

DIMENSIÓN	ESPECIFICACIÓN	TAMAÑO
L	Longitud calibrada	$L=3d$
Lt	Longitud total de la muestra	$Lt=20d$
R	Radio del cuello	$R=4d$
D	Diámetro de sección de agarre	$D=2d$

Tabla 2 Dimensiones de la muestra

7.1.1.2. Dimensión de las muestras

Todas las muestras empleadas en una serie de pruebas para la determinación de la vida a fatiga deben tener el mismo tamaño, forma y tolerancia de diámetro.

Con el fin de calcular la fuerza a aplicar para obtener el esfuerzo requerido, el diámetro mínimo real de cada muestra debe medirse con una precisión de 0,01 mm. Se debe tener cuidado durante la medición de la muestra antes de la prueba para asegurar que la superficie no se dañe.

La muestra recomendada posee una sección transversal circular sólida y diámetro mínimo de 6,35 mm (0,25 pulgadas) en la sección de prueba.

7.1.2. Preparación de las muestras

7.1.2.1. General

En cualquier programa de prueba de fatiga por flexión rotativa diseñado para caracterizar las propiedades intrínsecas de un material, es importante observar las siguientes recomendaciones en la preparación de muestras.

Una posible razón para desviarse de estas recomendaciones es si el programa de prueba tiene como objetivo determinar la influencia de un factor específico (tratamiento de superficie, oxidación, etc.) que sea incompatible con las recomendaciones.

En todos los casos, cualquier desviación debe anotarse en el informe de la prueba.

7.1.2.2. Marcado de la muestra

La marca o identificación única de cada muestra debe mantenerse en cada etapa de su preparación. Esto puede aplicarse utilizando cualquier método confiable en un área que no sea probable que desaparezca durante el mecanizado o que pueda afectar negativamente la calidad de la prueba. Al finalizar el proceso de mecanizado, es deseable que ambos extremos de cada muestra estén marcados de manera única para que, después de la falla de una muestra, cada mitad aún pueda ser identificada.

7.1.3. Procedimiento de prueba

7.1.3.1. Montaje de la muestra:

7.1.3.1.1. Alineación adecuada:

La muestra debe montarse en los dispositivos de sujeción de manera que se asegure una alineación adecuada. Esto es crucial para minimizar las tensiones residuales que podrían afectar los resultados de la prueba.

7.1.3.1.2. Dispositivos de sujeción:

Se deben utilizar los dispositivos de sujeción para evitar deslizamientos o movimientos durante la prueba. Estos dispositivos permiten que la muestra se mantenga firmemente en su lugar sin causar daños.

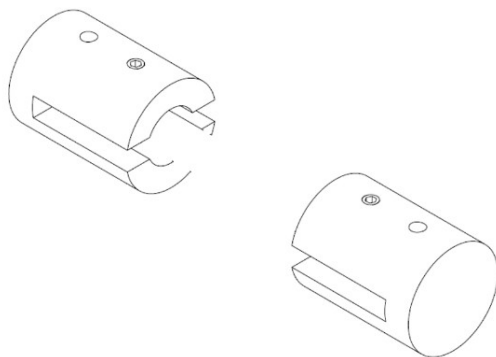


Ilustración 13 Dispositivos de sujeción

7.1.3.1.3. Precisión en el montaje:

Es importante que el montaje de la muestra se realice con precisión para asegurar que la fuerza aplicada durante la prueba sea uniforme y controlada.

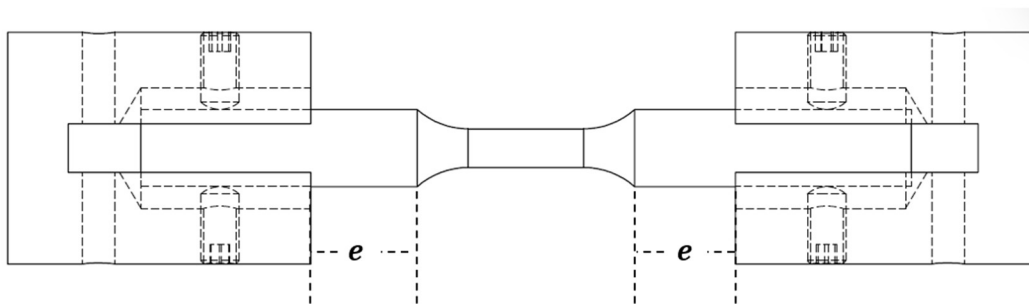


Ilustración 14 Precisión en el montaje

e → espacio entre el borde del dispositivo de sujeción y el inicio del cuello

7.1.3.1.4. Montaje en la máquina:

El montaje en los mandriles de la maquina se debe realizar con la probeta ya instalada en los elementos de sujeción, fijar correctamente el montaje a los mandriles asegurando una correcta aplicación de la fuerza y la rotación de la maquina en el ensayo.

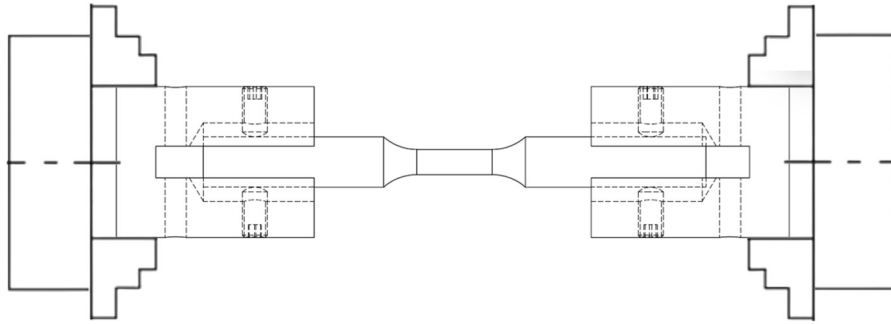


Ilustración 15 Montaje en la máquina

7.1.3.1.5. Verificación de la muestra:

Verifique la correcta alineación de la muestra en la máquina, verifique la superficie de la longitud calibrada en busca de daños provocados en el montaje que puedan desviar o influir en los resultados.

7.1.3.2. Aplicación de la fuerza

7.1.3.2.1. Control de la fuerza:

La fuerza es controlada por medio de una rueda excéntrica con la ayuda en un tornillo, la rueda debe estar totalmente centrada, la posición central deja la carga de la maquina en 0 KN. Cuando la muestra está en la maquina se debe hacer uso del tornillo y aplicar la carga con ayuda de una llave 10mm

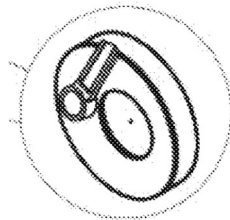


Ilustración 16 Rueda excéntrica

7.1.3.2.2. Registro de la fuerza:

Es importante registrar la magnitud de la fuerza aplicada durante la prueba, la fuerza aplicada a la muestra será medida por medio de un sistema que monitorea en tiempo real el comportamiento del sistema, el cual cuenta con un sensor de carga, un captador de señal USB y un software de manejo de información.



Ilustración 17 Diagrama adquisición de datos

7.1.3.2.2.1. Medición de la fuerza:

Según la curva de calibración del sensor de carga, la fuerza se calculará dependiendo la señal de excitación que se le aplique al sensor, la señal de salida es directamente proporcional a la señal de ingreso y se leerá siguiendo la gráfica.

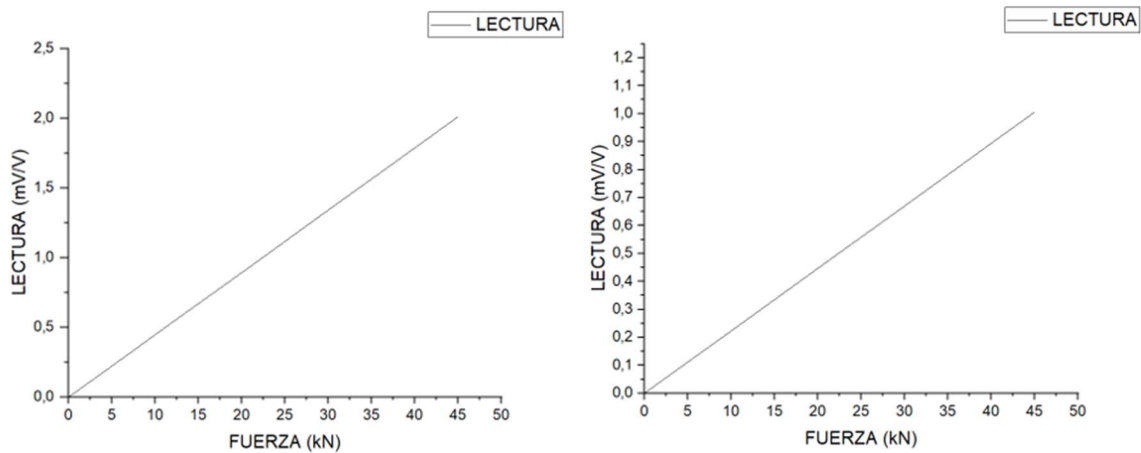


Ilustración 18 Curva de calibración con excitación de 10 V y 5V

7.1.3.2.3. Relación carga esfuerzo:

Como el sistema de medición de fuerza no mide el esfuerzo es necesario calcular la fuerza a aplicar por medio de un análisis de comportamiento del sistema que trabaja como una viga con 2 apoyos y sometida a dos fuerzas que flexionan el sistema.

De este análisis:

$$M = P * 45$$

Como el sistema está sometida a flexión

$$S_x = M * \frac{C}{i}$$

$$C = \frac{D}{2}$$

$$i = \frac{\pi}{4} * C^4$$

Simplificando el sistema de ecuaciones y buscando una ecuación del esfuerzo en función de la fuerza y el diámetro de la probeta, tenemos:

$$S_x = 458,36 * \frac{P}{D^3} \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

Donde:

S_x = esfuerzo a aplicar

M = Momento flector en la sección de interés

C = Distancia del eje centroidal a las fibras externas.

i = momento de inercia de la sección transversal con respecto a su eje centroidal.

P = carga del sistema

D = Diámetro de la probeta

7.1.3.2.4. Elección de la fuerza a aplicar en el ensayo:

Conociendo las propiedades del material calculadas por ensayos de tracción, se definen los siguientes porcentajes para el cálculo de las fuerzas a aplicar en los diferentes ensayos.

Se distribuirán del 40% S_y al 90% S_y , por ninguna razón se realizarán ensayos por encima de estos valores.

Se registrarán los valores calculados en la siguiente tabla.

%Sy	Sx [N/mm²]	P [N]
40%		
50%		
60%		
70%		
80%		
90%		

Tabla 3 Registro carga y esfuerzo

7.1.3.2.5. Monitoreo de la prueba:

Durante la prueba, se debe monitorear continuamente la fuerza aplicada para asegurar que se mantenga dentro de los parámetros establecidos. Cualquier desviación debe ser registrada y corregida.

7.1.3.3. Selección de la frecuencia:

7.1.3.3.1. Importancia de la frecuencia:

Factor crucial que puede influir significativamente en los resultados y la interpretación de los datos obtenidos.

7.1.3.3.1.1. Representatividad de las condiciones reales:

La frecuencia de prueba debe ser representativa de las condiciones reales a las que el material estará sometido en su aplicación práctica. Por ejemplo, componentes que operan a altas velocidades pueden requerir pruebas a frecuencias más altas para simular adecuadamente las condiciones de servicio

7.1.3.3.1.2. Duración de la prueba:

La frecuencia también afecta la duración total de la prueba. Frecuencias más altas permiten completar un mayor número de ciclos en un tiempo más corto, lo cual es beneficioso para estudios de vida a fatiga que requieren millones de ciclos. Sin embargo, esto debe equilibrarse con la necesidad de evitar el sobrecalentamiento y otros efectos adversos

7.1.3.3.1.3. Precisión y reproducibilidad:

Mantener una frecuencia constante y controlada es esencial para asegurar la precisión y reproducibilidad de los resultados. Cualquier variación en la frecuencia durante la prueba puede introducir incertidumbres y afectar la comparabilidad de los datos obtenidos en diferentes ensayos

7.1.3.3.2. Factores que considerar

7.1.3.3.2.1. Propiedades mecánicas de la muestra

Diferentes materiales tienen distintas propiedades mecánicas que afectan su comportamiento bajo cargas cíclicas. Por ejemplo, materiales dúctiles y frágiles pueden responder de manera diferente a la misma frecuencia de carga.

7.1.3.3.2.2. Sensibilidad a la temperatura

Algunos materiales son más sensibles a los cambios de temperatura que otros. La frecuencia debe seleccionarse para minimizar el calentamiento, ya que el incremento de temperatura puede modificar las propiedades mecánicas locales en la zona crítica donde se concentra el daño por fatiga. Dado que la fatiga es un fenómeno que se inicia y desarrolla de manera localizada, por ejemplo, en la superficie o en regiones con concentraciones de esfuerzo, incluso pequeños cambios térmicos en esa región pueden acelerar la nucleación y propagación de grietas, afectando la vida a fatiga de forma significativa.

7.1.3.3.2.3. Condiciones de prueba

La prueba se realizará a temperatura ambiente. La frecuencia debe ajustarse y mantenerse constante para evitar el sobrecalentamiento de la muestra.

7.1.3.3.2.4. Durabilidad y vida útil:

La frecuencia debe seleccionarse para simular las condiciones reales de servicio del material. Esto es importante para obtener resultados representativos de la durabilidad y la vida útil del material bajo condiciones de carga cíclica

7.1.3.3.2.5. Capacidad del equipo de ensayo - precisión y estabilidad

El equipo de ensayo debe ser capaz de mantener una frecuencia constante y precisa durante toda la prueba. Las variaciones en la frecuencia pueden afectar la reproducibilidad y la fiabilidad de los resultados.

7.1.3.3.2.6. Limitaciones del equipo

La máquina de fatiga multiaxial presenta limitaciones operativas a altas frecuencias debido a la generación de vibraciones indeseadas que pueden comprometer la estabilidad del ensayo y la integridad del sistema de sujeción. Aunque el equipo permite ajustar la frecuencia de aplicación de cargas, su diseño está optimizado para operar a frecuencias constantes y moderadas, priorizando la precisión en la aplicación de esfuerzos multiaxiales por encima de la variabilidad en la velocidad de carga. Por tanto, el control de frecuencia no constituye el objetivo principal del sistema, sino más bien la reproducción confiable de condiciones de carga multiaxial representativas.

7.1.3.3.3. Dispositivo de selección de frecuencia

Para un ensayo de fatiga por flexión rotativa se usa el sistema rotacional 1.

el sistema de rotación 1 tiene la posibilidad de ir desde 3,3 Hz hasta 58,3Hz, se define una frecuencia para el ensayo y se gradúa con ayuda del sistema de control de frecuencia.

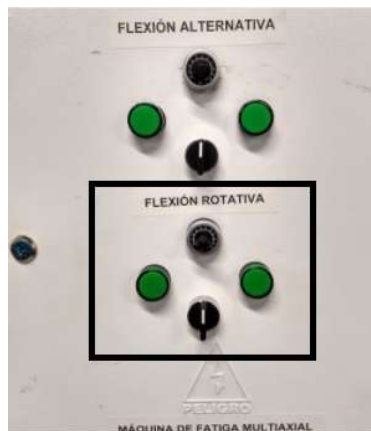


Ilustración 19 Control de frecuencia para ensayo de flexión rotativa

7.1.3.3.4. Registro de la frecuencia

7.1.3.3.4.1. Documentación

Registrar la frecuencia seleccionada para cada ensayo y verificar que se mantenga constante durante toda la prueba es fundamental. Este control asegura la reproducibilidad y la comparabilidad de los resultados entre diferentes muestras. En los informes de ensayo se deben incluir el valor de la frecuencia y las condiciones de prueba, proporcionando así un contexto completo para la interpretación de los resultados obtenidos.

7.1.3.4. Finalización de la prueba

La prueba debe finalizarse cuando se fracture la muestra. Se deben registrar todos los datos relevantes, incluyendo el número de ciclos hasta la falla y cualquier observación sobre el comportamiento de la muestra durante la prueba.

7.1.3.4.1. Registro de resultados

Documentar el número de ciclos alcanzados al momento de la falla, junto con los datos descritos en la tabla.

PROBETA	S (N/MM2)	CICLOS (N)	OBSERVACIÓN

Tabla 4 Registro de resultados

7.1.3.5. Informe de ensayo

7.1.3.5.1. Identificación del ensayo

7.1.3.5.1.1. Equipo utilizado

Descripción del equipo de ensayo,

7.1.3.5.1.2. Identificación de la muestra

- Código o número de identificación de la muestra para asegurar la trazabilidad.
- Descripción del material de la muestra, incluyendo su composición y propiedades mecánicas.

7.1.3.5.1.3. Preparación de la muestra

Detalles sobre cómo se preparó la muestra antes del ensayo, incluyendo cualquier tratamiento térmico o mecánico aplicado.

7.1.3.5.2. Condiciones del ensayo

Se detallará y documentará las condiciones y características del ensayo, con ayuda de las tablas 4 y 5.

7.1.3.5.3. Resultados del ensayo

Con ayuda de la tabla 6 se entregarán los detalles de número de ciclos para la falla y las características del comportamiento de las probetas.

7.1.3.5.4. Análisis de datos

7.1.3.5.4.1. Inspección post-prueba

Realizar una inspección visual de la muestra para identificar el modo de falla. Documentar cualquier característica notable de la fractura o daño.

7.1.3.5.4.2. Modelo de presentación de curvas s-n

Ejes del Gráfico:

- **Eje Vertical (S):** Representa la amplitud de la tensión cíclica o la tensión alterna.
- **Eje Horizontal (N):** Representa el número de ciclos hasta el fallo.

Datos de la Curva:

- **Puntos de Datos:** Cada punto en la curva representa un ensayo de fatiga realizado a una amplitud de tensión específica y el número de ciclos hasta el fallo.

- **Curva S-N:** La curva se traza conectando los puntos de datos. En muchos casos, se observa una disminución de la amplitud de tensión con el aumento del número de ciclos.

7.2. ENSAYO DE FLEXIÓN ALTERNATIVA

7.2.1. Forma y tamaño de la muestra.

7.2.1.1. Forma de la sección de prueba

Muestra para fatiga por flexión alternativa de sección de prueba de calibre uniforme.

Adaptado de: ASTM E 606: Standard practice for strain-controlled fatigue testing. Anual Book of ASTM Standards, 1998, vol 3.

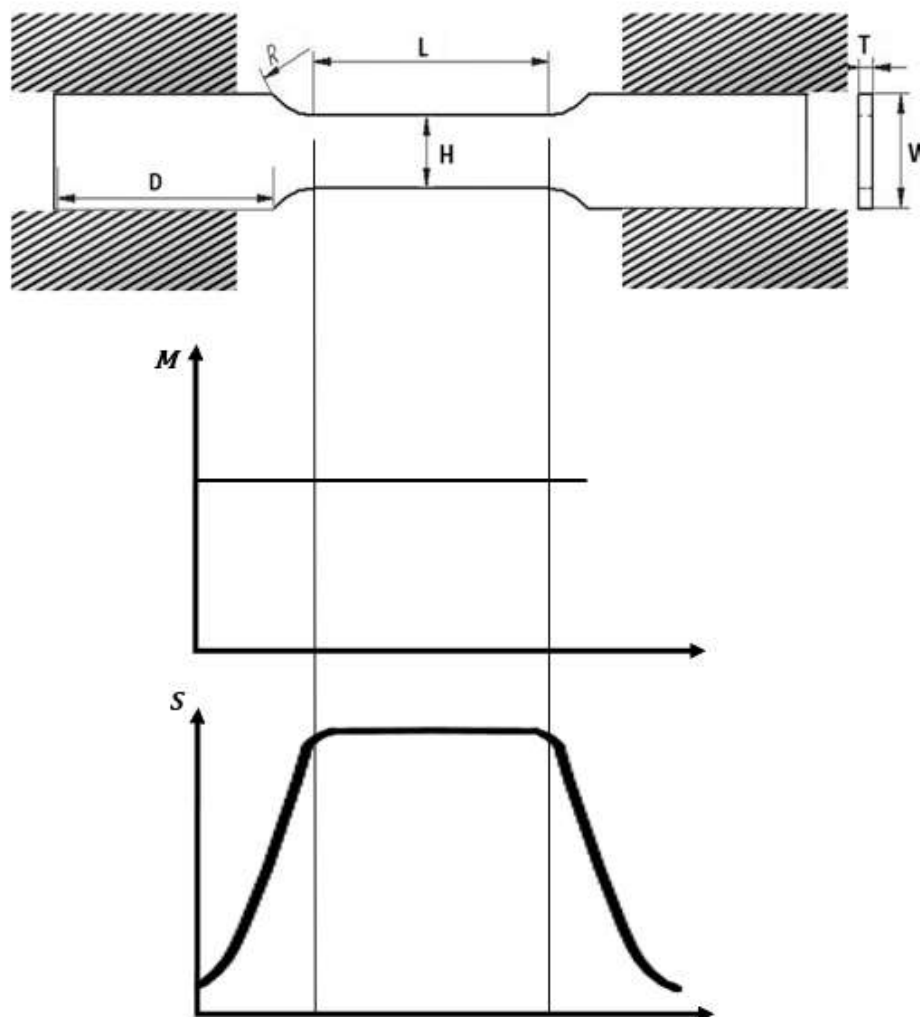


Ilustración 20 Muestra flexión alternativa, Momento y cortante

DIMENSIÓN	ESPECIFICACIÓN	TAMAÑO
L	Longitud calibrada	$L=3T$
W	Ancho	$W=4T$
R	Radio del cuello	$R=2T$
H	Ancho de trabajo	$H=W/2$
D	Longitud sección de agarre	10T
T	Espesor	T

Tabla 5 Dimensiones de la muestra plana

7.2.1.2. Dimensión de las muestras

Todas las muestras empleadas en una serie de pruebas para la determinación de la vida a fatiga deben tener el mismo tamaño, forma y tolerancia de espesor.

Con el fin de calcular la fuerza a aplicar para obtener el esfuerzo requerido, el espesor mínimo real de cada muestra debe medirse con una precisión de 0,01 mm. Se debe tener cuidado durante la medición de la muestra antes de la prueba para asegurar que la superficie no se dañe.

7.2.2. Preparación de las muestras

7.2.2.1. General

En cualquier programa de prueba de fatiga por flexión alternativa diseñado para caracterizar las propiedades intrínsecas de un material, es importante observar las siguientes recomendaciones en la preparación de muestras.

Una posible razón para desviarse de estas recomendaciones es si el programa de prueba tiene como objetivo determinar la influencia de un factor específico (tratamiento de superficie, oxidación, etc.) que sea incompatible con las recomendaciones.

En todos los casos, cualquier desviación debe anotarse en el informe de la prueba.

7.2.2.2. Marcado de la muestra

La marca o identificación única de cada muestra debe mantenerse en cada etapa de su preparación. Esto puede aplicarse utilizando cualquier método confiable en un área que no

sea probable que desaparezca durante el mecanizado o que pueda afectar negativamente la calidad de la prueba. Al finalizar el proceso de mecanizado, es deseable que ambos extremos de cada muestra estén marcados de manera única para que, después de la falla de una muestra, cada mitad aún pueda ser identificada.

7.2.3. Procedimiento de prueba

7.2.3.1. Montaje de la muestra:

7.2.3.1.1. Alineación adecuada:

La muestra debe montarse en los dispositivos de sujeción de manera que se asegure una alineación adecuada. Esto es crucial para minimizar las tensiones residuales que podrían afectar los resultados de la prueba.

7.2.3.1.2. Dispositivos de sujeción:

Se deben utilizar los dispositivos de sujeción para evitar deslizamientos o movimientos durante la prueba. Estos dispositivos permiten que la muestra se mantenga firmemente en su lugar sin causar daños.

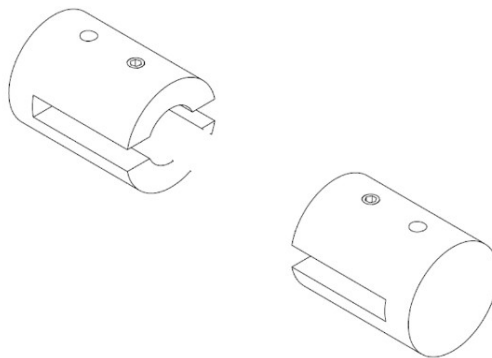


Ilustración 21 Dispositivos de sujeción

7.2.3.1.3. Precisión en el montaje:

Es importante que el montaje de la muestra se realice con precisión para asegurar que la fuerza aplicada durante la prueba sea uniforme y controlada.

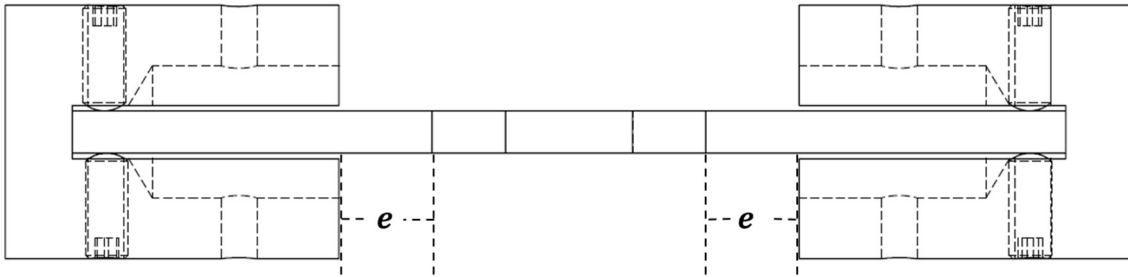


Ilustración 22 Precisión en el montaje pieza plana

e → espacio entre el borde del dispositivo de sujeción y el inicio del cuello

7.2.3.1.4. Montaje en la máquina:

El montaje en los mandriles de la máquina se debe realizar con la probeta ya instalada en los elementos de sujeción, fijar correctamente el montaje a los mandriles asegurando una correcta aplicación de la fuerza y movimiento de la máquina en el ensayo.

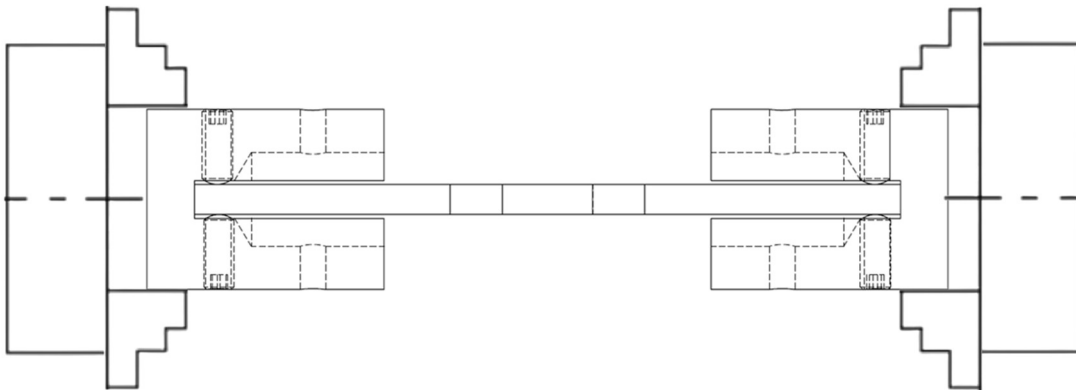


Ilustración 23 Montaje en la máquina de pieza plana

7.2.3.1.5. Verificación de la muestra:

Verifique la correcta alineación de la muestra en la máquina, verifique la superficie de la longitud calibrada en busca de daños provocados en el montaje que puedan desviar o influir en los resultados.

7.2.3.2. Aplicación de la fuerza

7.2.3.2.1. Control de la fuerza:

La fuerza es controlada por medio de una rueda excéntrica con la ayuda en un tornillo, la rueda debe estar totalmente centrada, la posición central deja la carga de la máquina en 0 KN.

Cuando la muestra está en la maquina se debe hacer uso del tornillo y aplicar la carga con ayuda de una llave 10mm

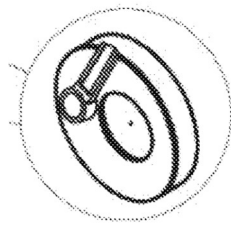


Ilustración 24 Rueda excéntrica

7.2.3.2.2. Registro de la fuerza:

Es importante registrar la magnitud de la fuerza aplicada durante la prueba, la fuerza aplicada a la muestra será medida por medio de un sistema que monitorea en tiempo real el comportamiento del sistema, el cual cuenta con un sensor de carga, un captador de señal USB y un software de manejo de información.

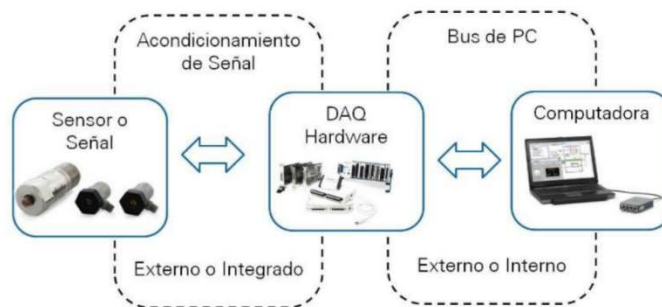


Ilustración 25 Diagrama adquisición de datos

7.2.3.2.2.1. Medición de la fuerza:

Según la curva de calibración del sensor de carga, la fuerza se calculará dependiendo la señal de excitación que se le aplique al sensor, la señal de salida es directamente proporcional a la señal de ingreso y se leerá siguiendo la gráfica.

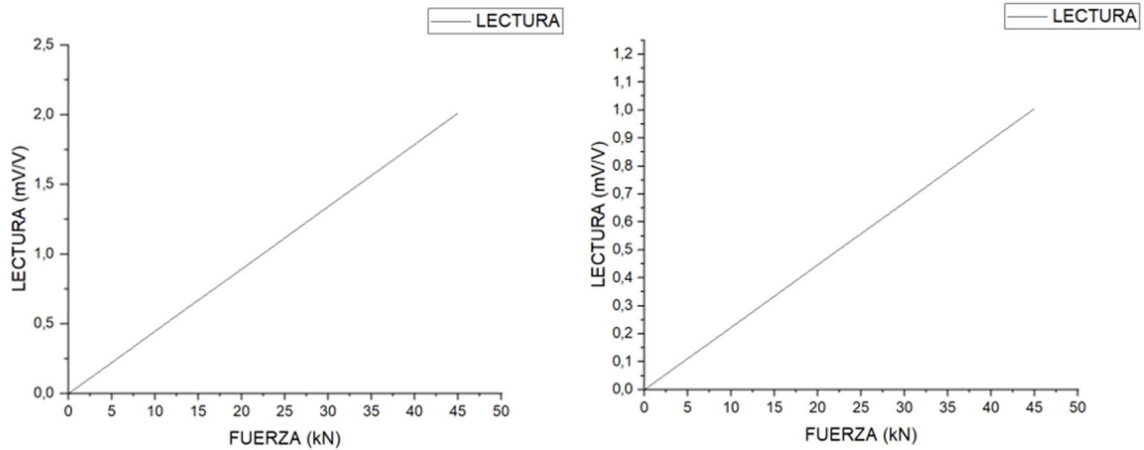


Ilustración 26 Curva de calibración con excitación de 10 V y 5V

7.2.3.2.3. Relación carga esfuerzo:

Como el sistema de medición de fuerza no mide el esfuerzo es necesario calcular la fuerza a aplicar por medio de un análisis de comportamiento del sistema que trabaja como una viga con 2 apoyos y sometida a dos fuerzas que flexionan el sistema.

De este análisis:

$$M = P * 45$$

Como el sistema está sometida a flexión

$$S_x = M * \frac{C}{i}$$

$$C = \frac{H}{2}$$

$$i = \frac{H}{12} * T^3$$

Simplificando el sistema de ecuaciones y buscando una ecuación del esfuerzo en función de la fuerza y el diámetro de la probeta, tenemos:

$$S_x = 270 * \frac{P}{T^3} \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

Donde:

S_x = esfuerzo a aplicar

M = Momento flector en la sección de interés

C = Distancia del eje centroidal a las fibras externas.

i = momento de inercia de la sección transversal con respecto a su eje centroidal.

P = carga del sistema

D = Diámetro de la probeta

7.2.3.2.4. Elección de la fuerza a aplicar en el ensayo:

Conociendo las propiedades del material calculadas por ensayos de tracción, se definen los siguientes porcentajes para el cálculo de las fuerzas a aplicar en los diferentes ensayos.

Se distribuirán del 40% S_y al 90% S_y , por ninguna razón se realizarán ensayos por encima de estos valores.

Se registrarán los valores calculados en la siguiente tabla.

%S_y	S_x [N/mm²]	P [N]
40%		
50%		
60%		
70%		
80%		
90%		

Tabla 6 Registro carga y esfuerzo ensayo flexión alternativa

7.2.3.2.5. Monitoreo de la prueba:

Durante la prueba, se debe monitorear continuamente la fuerza aplicada para asegurar que se mantenga dentro de los parámetros establecidos. Cualquier desviación debe ser registrada y corregida.

7.2.3.3. Selección de la frecuencia:

7.2.3.3.1. Importancia de la frecuencia:

Factor crucial que puede influir significativamente en los resultados y la interpretación de los datos obtenidos.

7.2.3.3.1.1. Representatividad de las condiciones reales:

La frecuencia de prueba debe ser representativa de las condiciones reales a las que el material estará sometido en su aplicación práctica. Por ejemplo, componentes que operan a altas velocidades pueden requerir pruebas a frecuencias más altas para simular adecuadamente las condiciones de servicio

7.2.3.3.1.2. Minimización de efectos dinámicos:

A frecuencias muy altas, pueden surgir efectos dinámicos que no están presentes en condiciones de carga estática o cuasi-estática. Estos efectos pueden incluir resonancias y vibraciones que podrían influir en la respuesta del material y en la interpretación de los resultados

7.2.3.3.1.3. Duración de la prueba:

La frecuencia también afecta la duración total de la prueba. Frecuencias más altas permiten completar un mayor número de ciclos en un tiempo más corto, lo cual es beneficioso para estudios de vida a fatiga que requieren millones de ciclos. Sin embargo, esto debe equilibrarse con la necesidad de evitar el sobrecalentamiento y otros efectos adversos

7.2.3.3.1.4. Precisión y reproducibilidad:

Mantener una frecuencia constante y controlada es esencial para asegurar la precisión y reproducibilidad de los resultados. Cualquier variación en la frecuencia durante la prueba puede introducir incertidumbres y afectar la comparabilidad de los datos obtenidos en diferentes ensayos

7.2.3.3.2. Factores que considerar

7.2.3.3.2.1. Propiedades mecánicas de la muestra

Diferentes materiales tienen distintas propiedades mecánicas que afectan su comportamiento bajo cargas cíclicas. Por ejemplo, materiales dúctiles y frágiles pueden responder de manera diferente a la misma frecuencia de carga.

7.2.3.3.2.2. Sensibilidad a la temperatura

Algunos materiales son más sensibles a los cambios de temperatura que otros. La frecuencia debe seleccionarse para minimizar el calentamiento, ya que el incremento de temperatura puede modificar las propiedades mecánicas locales en la zona crítica donde se concentra el daño por fatiga. Dado que la fatiga es un fenómeno que se inicia y desarrolla de manera localizada, por ejemplo, en la superficie o en regiones con concentraciones de esfuerzo, incluso pequeños cambios térmicos en esa región pueden acelerar la nucleación y propagación de grietas, afectando la vida a fatiga de forma significativa.

7.2.3.3.2.3. Condiciones de prueba

La prueba se realizará a temperatura ambiente. La frecuencia debe ajustarse y mantenerse constante para evitar el sobrecalentamiento de la muestra.

7.2.3.3.2.4. Durabilidad y vida útil:

La frecuencia debe seleccionarse para simular las condiciones reales de servicio del material. Esto es importante para obtener resultados representativos de la durabilidad y la vida útil del material bajo condiciones de carga cíclica.

7.2.3.3.2.5. Capacidad del equipo de ensayo - precisión y estabilidad

El equipo de ensayo debe ser capaz de mantener una frecuencia constante y precisa durante toda la prueba. Las variaciones en la frecuencia pueden afectar la reproducibilidad y la fiabilidad de los resultados.

7.2.3.3.2.6. Limitaciones del equipo

La máquina de fatiga multiaxial presenta limitaciones operativas a altas frecuencias debido a la generación de vibraciones indeseadas que pueden comprometer la estabilidad del ensayo y la integridad del sistema de sujeción. Aunque el equipo permite ajustar la frecuencia de aplicación de cargas, su diseño está optimizado para operar a frecuencias constantes y moderadas, priorizando la precisión en la aplicación de esfuerzos multiaxiales por encima de la variabilidad en la velocidad de carga. Por tanto, el control de frecuencia no constituye el

objetivo principal del sistema, sino más bien la reproducción confiable de condiciones de carga multiaxial representativas.

7.2.3.3.3. Dispositivo de selección de frecuencia

Para un ensayo de fatiga por flexión alternativa se usa el sistema rotacional 2.

el sistema de rotación 2 tiene la posibilidad de ir desde 3,3 Hz hasta 58,3Hz, se define una frecuencia para el ensayo y se gradúa con ayuda del sistema de control de frecuencia.

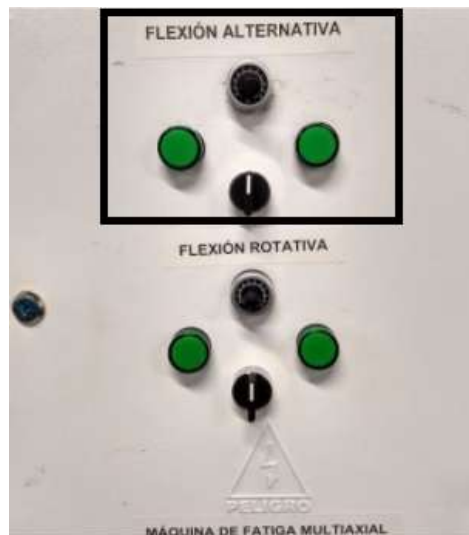


Ilustración 27 Control de frecuencia para ensayo de flexión alternativa

7.2.3.3.4. Registro de la frecuencia

7.2.3.3.4.1. Documentación

Registrar la frecuencia seleccionada para cada ensayo y verificar que se mantenga constante durante toda la prueba es fundamental. Este control asegura la reproducibilidad y la comparabilidad de los resultados entre diferentes muestras. En los informes de ensayo se deben incluir el valor de la frecuencia y las condiciones de prueba, proporcionando así un contexto completo para la interpretación de los resultados obtenidos.

7.2.3.4. Finalización de la prueba

La prueba debe finalizarse cuando se fracture la muestra. Se deben registrar todos los datos relevantes, incluyendo el número de ciclos hasta la falla y cualquier observación sobre el comportamiento de la muestra durante la prueba.

7.2.3.4.1. Registro de resultados

Documentar el número de ciclos alcanzados al momento de la falla, junto con los datos descritos en la tabla.

PROBETA	S (N/MM2)	CICLOS (N)	OBSERVACIÓN

Tabla 7 Registro de resultados

7.2.3.5. Informe de ensayo

7.2.3.5.1. Identificación del ensayo

7.2.3.5.1.1. Equipo utilizado

Descripción del equipo de ensayo,

7.2.3.5.1.2. Identificación de la muestra

- Código o número de identificación de la muestra para asegurar la trazabilidad.
- Descripción del material de la muestra, incluyendo su composición y propiedades mecánicas.

7.2.3.5.1.3. Preparación de la muestra

Detalles sobre cómo se preparó la muestra antes del ensayo, incluyendo cualquier tratamiento térmico o mecánico aplicado.

7.2.3.5.2. Condiciones del ensayo

Se detallará y documentará las condiciones y características del ensayo, con ayuda de las tablas 4 y 5.

7.2.3.5.3. Resultados del ensayo

Con ayuda de la tabla 6 se entregarán los detalles de número de ciclos para la falla y las características del comportamiento de las probetas.

7.2.3.5.4. Análisis de datos

7.2.3.5.4.1. Inspección post-prueba

Realizar una inspección visual de la muestra para identificar el modo de falla. Documentar cualquier característica notable de la fractura o daño.

7.2.3.5.4.2. Modelo de presentación de curvas s-n

Ejes del Gráfico:

- **Eje Vertical (S):** Representa la amplitud de la tensión cíclica o la tensión alterna.
- **Eje Horizontal (N):** Representa el número de ciclos hasta el fallo.

Datos de la Curva:

- **Puntos de Datos:** Cada punto en la curva representa un ensayo de fatiga realizado a una amplitud de tensión específica y el número de ciclos hasta el fallo.
- **Curva S-N:** La curva se traza conectando los puntos de datos. En muchos casos, se observa una disminución de la amplitud de tensión con el aumento del número de ciclos.

7.3. ENSAYO DE FATIGA MULTIAXIAL

7.3.1. Forma y tamaño de la muestra.

7.3.1.1. Forma de la sección de prueba

Muestra para fatiga por flexión rotativa de sección de prueba de calibre uniforme. Adaptado de: ASTM E 606: Standard practice for strain-controlled fatigue testing. Annual Book of ASTM Standards, 1998, vol 3.

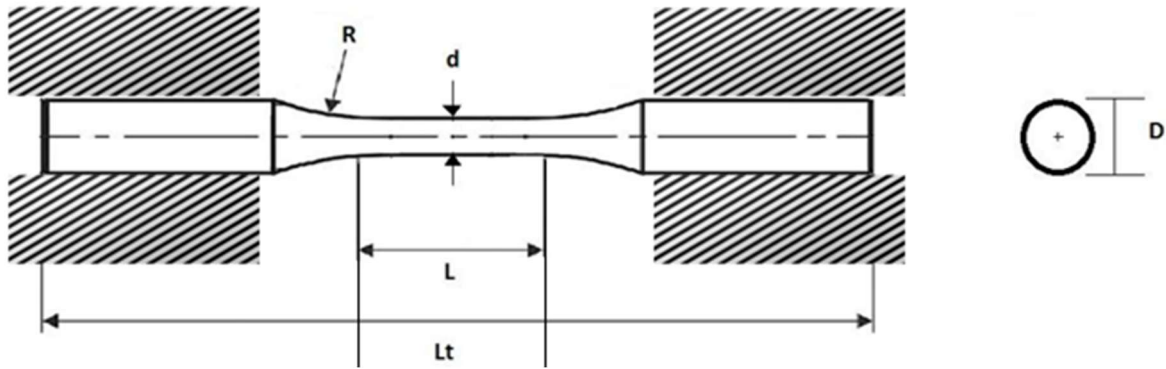


Ilustración 28 Muestra multiaxial

DIMENSIÓN	ESPECIFICACIÓN	TAMAÑO
L	Longitud calibrada	$L=3d$
Lt	Longitud total de la muestra	$Lt=20d$
R	Radio del cuello	$R=4d$
D	Diámetro de sección de agarre	$D=2d$

Tabla 8 Dimensiones de la muestra

7.3.1.2. Dimensión de las muestras

Todas las muestras empleadas en una serie de pruebas para la determinación de la vida a fatiga deben tener el mismo tamaño, forma y tolerancia de diámetro.

Con el fin de calcular la fuerza a aplicar para obtener el esfuerzo requerido, el diámetro mínimo real de cada muestra debe medirse con una precisión de 0,01 mm. Se debe tener cuidado durante la medición de la muestra antes de la prueba para asegurar que la superficie no se dañe.

La muestra recomendada posee una sección transversal circular sólida y diámetro mínimo de 6,35 mm (0,25 pulgadas) en la sección de prueba.

7.3.2. Preparación de las muestras

7.3.2.1. General

En cualquier programa de prueba de fatiga multiaxial diseñado para caracterizar las propiedades intrínsecas de un material, es importante observar las siguientes recomendaciones en la preparación de muestras.

Una posible razón para desviarse de estas recomendaciones es si el programa de prueba tiene como objetivo determinar la influencia de un factor específico (tratamiento de superficie, oxidación, etc.) que sea incompatible con las recomendaciones.

En todos los casos, cualquier desviación debe anotarse en el informe de la prueba.

7.3.2.2. Marcado de la muestra

La marca o identificación única de cada muestra debe mantenerse en cada etapa de su preparación. Esto puede aplicarse utilizando cualquier método confiable en un área que no sea probable que desaparezca durante el mecanizado o que pueda afectar negativamente la calidad de la prueba. Al finalizar el proceso de mecanizado, es deseable que ambos extremos de cada muestra estén marcados de manera única para que, después de la falla de una muestra, cada mitad aún pueda ser identificada.

7.3.3. Procedimiento de prueba

7.3.3.1. Montaje de la muestra:

7.3.3.1.1. Alineación adecuada:

La muestra debe montarse en los dispositivos de sujeción de manera que se asegure una alineación adecuada. Esto es crucial para minimizar las tensiones residuales que podrían afectar los resultados de la prueba.

7.3.3.1.2. Dispositivos de sujeción:

Se deben utilizar los dispositivos de sujeción para evitar deslizamientos o movimientos durante la prueba. Estos dispositivos permiten que la muestra se mantenga firmemente en su lugar sin causar daños.

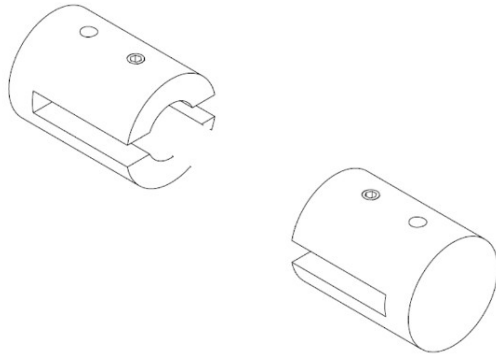


Ilustración 29 Dispositivos de sujeción

7.3.3.1.3. Precisión en el montaje:

Es importante que el montaje de la muestra se realice con precisión para asegurar que la fuerza aplicada durante la prueba sea uniforme y controlada.

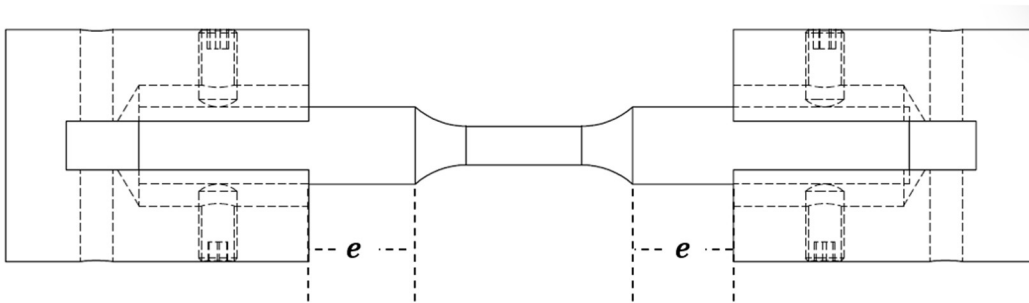


Ilustración 30 Precisión en el montaje

e → espacio entre el borde del dispositivo de sujeción y el inicio del cuello

7.3.3.1.4. Montaje en la máquina:

El montaje en los mandriles de la máquina se debe realizar con la probeta ya instalada en los elementos de sujeción, fijar correctamente el montaje a los mandriles asegurando una correcta aplicación de la fuerza y la rotación de la máquina en el ensayo.

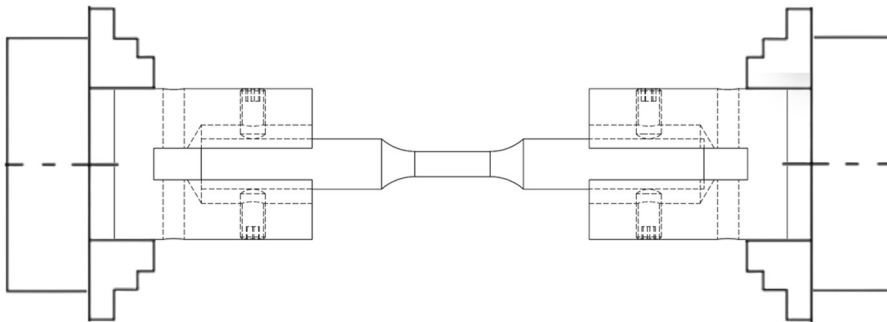


Ilustración 31 Montaje en la máquina

7.3.3.1.5. Verificación de la muestra:

Verifique la correcta alineación de la muestra en la máquina, verifique la superficie de la longitud calibrada en busca de daños provocados en el montaje que puedan desviar o influir en los resultados.

7.3.3.2. Aplicación de la fuerza

7.3.3.2.1. Control de la fuerza:

La fuerza es controlada por medio de una rueda excéntrica con la ayuda en un tornillo, la rueda debe estar totalmente centrada, la posición central deja la carga de la máquina en 0 KN. Cuando la muestra está en la máquina se debe hacer uso del tornillo y aplicar la carga con ayuda de una llave 10mm

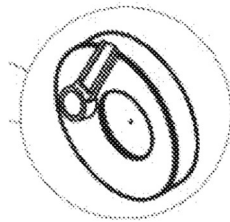


Ilustración 32 Rueda excéntrica

7.3.3.2.2. Registro de la fuerza:

Es importante registrar la magnitud de la fuerza aplicada durante la prueba, la fuerza aplicada a la muestra será medida por medio de un sistema que monitorea en tiempo real el comportamiento del sistema, el cual cuenta con un sensor de carga, un captador de señal USB y un software de manejo de información.

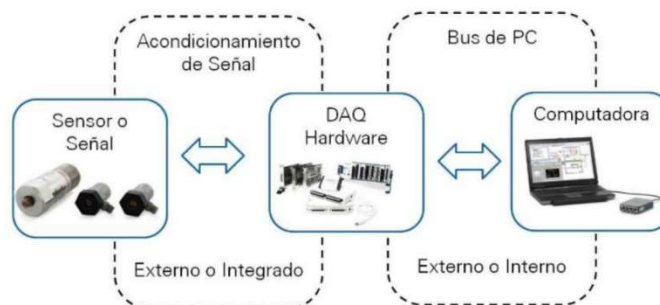


Ilustración 33 Diagrama adquisición de datos

7.3.3.2.2.1. Medición de la fuerza:

Según la curva de calibración del sensor de carga, la fuerza se calculará dependiendo la señal de excitación que se le aplique al sensor, la señal de salida es directamente proporcional a la señal de ingreso y se leerá siguiendo la gráfica.

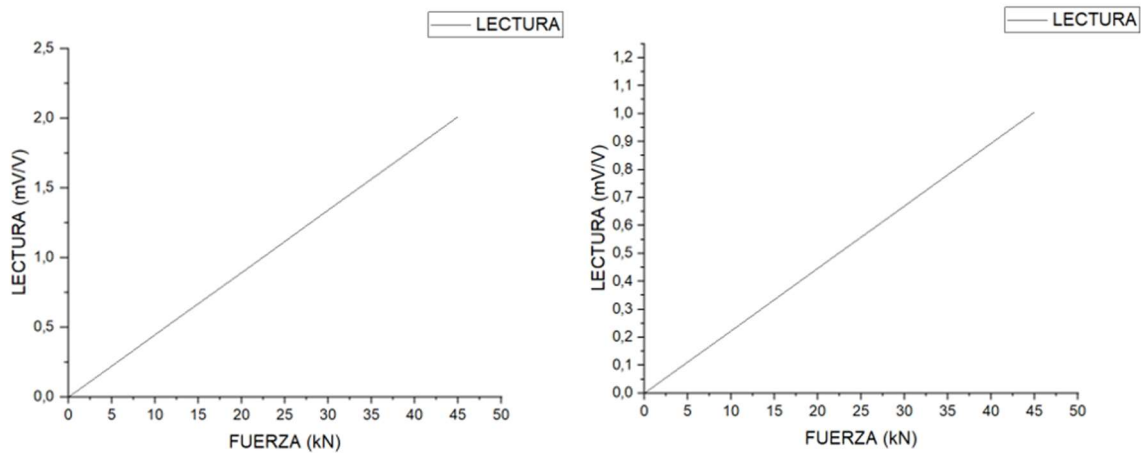


Ilustración 34 Curva de calibración con excitación de 10 V y 5V

7.3.3.2.3. Relación carga esfuerzo:

Como el sistema de medición de fuerza no mide el esfuerzo es necesario calcular la fuerza a aplicar por medio de un análisis de comportamiento del sistema que trabaja como una viga con 2 apoyos y sometida a dos fuerzas que flexionan el sistema.

De este análisis:

$$M = P * 45$$

Como el sistema está sometida a flexión

$$S_x = M * \frac{C}{i}$$

$$C = \frac{D}{2}$$

$$i = \frac{\pi}{4} * C^4$$

Simplificando el sistema de ecuaciones y buscando una ecuación del esfuerzo en función de la fuerza y el diámetro de la probeta, tenemos:

$$S_x = 458,36 * \frac{P}{D^3} \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

Donde:

S_x = esfuerzo a aplicar

M = Momento flector en la sección de interés

C = Distancia del eje centroidal a las fibras externas.

i = momento de inercia de la sección transversal con respecto a su eje centroidal.

P = carga del sistema

D = Diámetro de la probeta

7.3.3.2.4. Elección de la fuerza a aplicar en el ensayo:

Conociendo las propiedades del material calculadas por ensayos de tracción, se definen los siguientes porcentajes para el cálculo de las fuerzas a aplicar en los diferentes ensayos.

Se distribuirán del 40% S_y al 90% S_y , por ninguna razón se realizarán ensayos por encima de estos valores.

Se registrarán los valores calculados en la siguiente tabla.

%S_y	S_x [N/mm²]	P [N]
40%		
50%		
60%		
70%		
80%		
90%		

Tabla 9 Registro carga y esfuerzo

7.3.3.2.5. Monitoreo de la prueba:

Durante la prueba, se debe monitorear continuamente la fuerza aplicada para asegurar que se mantenga dentro de los parámetros establecidos. Cualquier desviación debe ser registrada y corregida.

7.3.3.3. Selección de la frecuencia:

7.3.3.3.1. Importancia de la frecuencia:

Factor crucial que puede influir significativamente en los resultados y la interpretación de los datos obtenidos.

7.3.3.3.1.1. Representatividad de las condiciones reales:

La frecuencia de prueba debe ser representativa de las condiciones reales a las que el material estará sometido en su aplicación práctica. Por ejemplo, componentes que operan a altas velocidades pueden requerir pruebas a frecuencias más altas para simular adecuadamente las condiciones de servicio

7.3.3.3.1.2. Minimización de efectos dinámicos:

A frecuencias muy altas, pueden surgir efectos dinámicos que no están presentes en condiciones de carga estática o cuasi-estática. Estos efectos pueden incluir resonancias y vibraciones que podrían influir en la respuesta del material y en la interpretación de los resultados

7.3.3.3.1.3. Duración de la prueba:

La frecuencia también afecta la duración total de la prueba. Frecuencias más altas permiten completar un mayor número de ciclos en un tiempo más corto, lo cual es beneficioso para estudios de vida a fatiga que requieren millones de ciclos. Sin embargo, esto debe equilibrarse con la necesidad de evitar el sobrecalentamiento y otros efectos adversos

7.3.3.3.1.4. Precisión y reproducibilidad:

Mantener una frecuencia constante y controlada es esencial para asegurar la precisión y reproducibilidad de los resultados. Cualquier variación en la frecuencia durante la prueba puede introducir incertidumbres y afectar la comparabilidad de los datos obtenidos en diferentes ensayos

7.3.3.3.2. Factores que considerar

7.3.3.3.2.1. Propiedades mecánicas de la muestra

Diferentes materiales tienen distintas propiedades mecánicas que afectan su comportamiento bajo cargas cíclicas. Por ejemplo, materiales dúctiles y frágiles pueden responder de manera diferente a la misma frecuencia de carga.

7.3.3.3.2.2. Sensibilidad a la temperatura

Algunos materiales son más sensibles a los cambios de temperatura que otros. La frecuencia debe seleccionarse para minimizar el calentamiento, ya que el incremento de temperatura puede modificar las propiedades mecánicas locales en la zona crítica donde se concentra el daño por fatiga. Dado que la fatiga es un fenómeno que se inicia y desarrolla de manera localizada, por ejemplo, en la superficie o en regiones con concentraciones de esfuerzo, incluso pequeños cambios térmicos en esa región pueden acelerar la nucleación y propagación de grietas, afectando la vida a fatiga de forma significativa

7.3.3.3.2.3. Condiciones de prueba

La prueba se realizará a temperatura ambiente La frecuencia debe ajustarse y mantenerse constante para evitar el sobrecalentamiento de la muestra.

7.3.3.3.2.4. Durabilidad y vida útil:

La frecuencia debe seleccionarse para simular las condiciones reales de servicio del material. Esto es importante para obtener resultados representativos de la durabilidad y la vida útil del material bajo condiciones de carga cíclica

7.3.3.3.2.5. Capacidad del equipo de ensayo - precisión y estabilidad

El equipo de ensayo debe ser capaz de mantener una frecuencia constante y precisa durante toda la prueba. Las variaciones en la frecuencia pueden afectar la reproducibilidad y la fiabilidad de los resultados.

7.3.3.3.2.6. Limitaciones del equipo

La máquina de fatiga multiaxial presenta limitaciones operativas a altas frecuencias debido a la generación de vibraciones indeseadas que pueden comprometer la estabilidad del ensayo

y la integridad del sistema de sujeción. Aunque el equipo permite ajustar la frecuencia de aplicación de cargas, su diseño está optimizado para operar a frecuencias constantes y moderadas, priorizando la precisión en la aplicación de esfuerzos multiaxiales por encima de la variabilidad en la velocidad de carga. Por tanto, el control de frecuencia no constituye el objetivo principal del sistema, sino más bien la reproducción confiable de condiciones de carga multiaxial representativas.

7.3.3.3.3. Dispositivo de selección de frecuencia

Para un ensayo de fatiga multiaxial se usa el sistema rotacional 1 y el sistema rotacional 2 simultáneamente, dado que el sistema rotacional 1 controla la flexión rotativa y el 2 la flexión alternativa.

El sistema de rotación 1 y 2 tienen la posibilidad de ir desde 3,3 Hz hasta 58,3Hz, se define una frecuencia para el ensayo y se gradúa con ayuda del sistema de control de frecuencia.

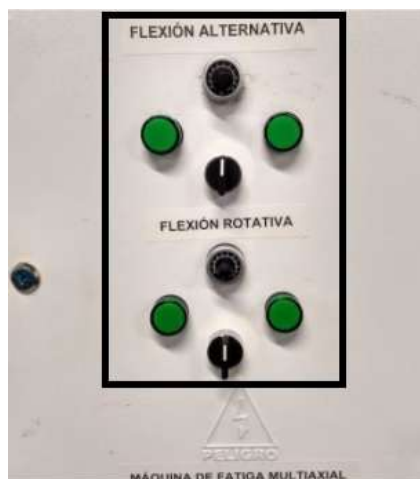


Ilustración 35 Control de frecuencia para ensayo de fatiga multiaxial

7.3.3.3.4. Registro de la frecuencia

7.3.3.3.4.1. Documentación

Registrar la frecuencia seleccionada para cada ensayo y verificar que se mantenga constante durante toda la prueba es fundamental. Este control asegura la reproducibilidad y la comparabilidad de los resultados entre diferentes muestras. En los informes de ensayo se deben incluir el valor de la frecuencia y las condiciones de prueba, proporcionando así un contexto completo para la interpretación de los resultados obtenidos.

7.3.3.4. Finalización de la prueba

La prueba debe finalizarse cuando se fracture la muestra. Se deben registrar todos los datos relevantes, incluyendo el número de ciclos hasta la falla y cualquier observación sobre el comportamiento de la muestra durante la prueba.

7.3.3.4.1. Registro de resultados

Documentar el número de ciclos alcanzados al momento de la falla, junto con los datos descritos en la tabla.

Probeta	σ (N/mm ²)	Alt (N)	Ciclos1	Observación

Tabla 10 Registro de resultados

7.3.3.5. Informe de ensayo

7.3.3.5.1. Identificación del ensayo

7.3.3.5.1.1. Equipo utilizado

Descripción del equipo de ensayo,

7.3.3.5.1.2. Identificación de la muestra

- Código o número de identificación de la muestra para asegurar la trazabilidad.
- Descripción del material de la muestra, incluyendo su composición y propiedades mecánicas.

7.3.3.5.1.3. Preparación de la muestra

Detalles sobre cómo se preparó la muestra antes del ensayo, incluyendo cualquier tratamiento térmico o mecánico aplicado.

7.3.3.5.2. Condiciones del ensayo

Se detallará y documentará las condiciones y características del ensayo, con ayuda de las tablas 4 y 5.

7.3.3.5.3. Resultados del ensayo

Con ayuda de la tabla 6 se entregarán los detalles de número de ciclos para la falla y las características del comportamiento de las probetas.

7.3.3.5.4. Análisis de datos

7.3.3.5.4.1. Inspección post-prueba

Realizar una inspección visual de la muestra para identificar el modo de falla. Documentar cualquier característica notable de la fractura o daño.

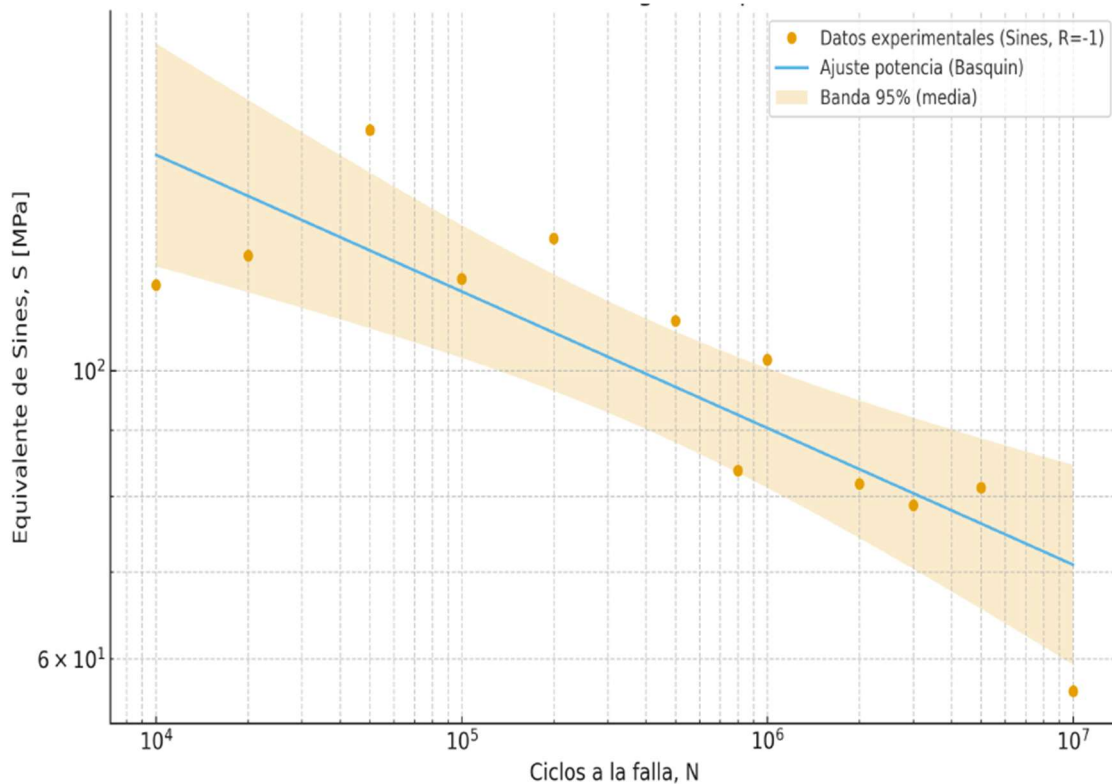
7.3.3.5.4.2. Modelo de presentación de curvas s-n

Ejes del Gráfico:

- **Eje Vertical (S):** Se representa una magnitud equivalente de tensión o deformación, calculada según el criterio multiaxial adoptado (por ejemplo, tensión equivalente de Sines o Crossland, amplitud de deformación en el plano crítico, densidad de energía de deformación, etc.)
- **Eje Horizontal (N):** Representa el número de ciclos hasta el fallo.

7.3.3.5.4.3. Ajuste con criterio de sines para aluminio.

CICLOS (N)	σ - experimental	σ -ideal
13634	116.42	139.69
24971	122.64	131.24
57459	153.21	120.85
135672	117.67	113.54
245328	126.38	106.67
505896	109.25	98.23



Ajuste de Basquin

$$S = A * N^B$$

$$S = 386.26 * N^{-0,1052}$$

La curva S–N obtenida mediante el criterio de Sines para el aluminio 6061-T6 evidencia un comportamiento característico de este material bajo condiciones de carga completamente alternante, con una pendiente aproximada de $b = -0.1052$ en la región de alto ciclo. El ajuste mediante la ecuación de Basquin presenta un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.721$, lo que indica una correlación aceptable entre los datos experimentales y el modelo de regresión. La dispersión observada en los puntos experimentales, representada en escala logarítmica, refleja la variabilidad inherente de los ensayos de fatiga multiaxial. En conjunto, los resultados permiten establecer una base confiable para el análisis de vida a fatiga en componentes de aluminio 6061-T6, y sirven como referencia para la validación experimental en futuros desarrollos y aplicaciones de ingeniería.

8. FASE 5. LISTAR LA TERMINOLOGÍA NECESARIA PARA LA EJECUCIÓN Y COMPRENSIÓN DETALLADA DEL DOCUMENTO DEL DESARROLLO DE LOS ENSAYOS

- **Longitud calibrada (L):** Longitud de la sección central de la muestra donde se aplica la carga.
- **Longitud total de la muestra (Lt):** Longitud completa de la muestra, incluyendo las zonas de sujeción
- **Radio del cuello (R):** Radio de curvatura en la transición entre la sección calibrada y las zonas de agarre.
- **Diámetro de sección de agarre (D):** Diámetro de las zonas extremas de la muestra donde se fija a los dispositivos de sujeción.
- **Momento flector (M):** Momento generado por la carga aplicada en la sección de interés.
- **Carga del sistema (P):** Fuerza externa aplicada durante el ensayo, medida en Newtons.
- **Frecuencia (Hz):** Número de ciclos de carga por segundo. Influye en el calentamiento y duración del ensayo.
- **Curva S-N:** Gráfico que relaciona la amplitud de esfuerzo (S) con el número de ciclos hasta la falla (N).
- **Ciclos hasta falla (N):** Número de ciclos que soporta la muestra antes de fracturarse.
- **Dispositivos de sujeción:** Mecanismos que fijan la muestra en la máquina para evitar deslizamientos durante la prueba.
- **Alineación adecuada:** Posicionamiento preciso de la muestra para minimizar tensiones residuales y errores.
- **Momento de inercia (i):** Propiedad geométrica de la sección transversal.
- **Distancia centroidal (C):** Distancia desde el eje centroidal hasta las fibras externas.
- **Sy (Límite elástico):** Esfuerzo máximo que el material puede soportar sin deformación plástica.

- **Histéresis:** Pérdida de energía en forma de calor durante los ciclos de carga y descarga.
- **Efectos dinámicos:** Fenómenos como resonancias o vibraciones a altas frecuencias que alteran los resultados.
- **Fatiga:** Fenómeno de degradación y fallo progresivo de un material sometido a cargas cíclicas o repetidas, incluso por debajo de su límite elástico.
- **Flexión:** Tipo de esfuerzo que induce deformación curvatura en un material cuando se aplica una carga perpendicular a su eje longitudinal. Genera tensiones de tracción en un lado y compresión en el opuesto.
- **Flexión rotativa:** Tipo de ensayo de fatiga donde una muestra gira bajo carga constante, generando esfuerzos alternantes de tracción y compresión en cada ciclo.
- **Grieta:** Discontinuidad superficial o interna en un material, que actúa como concentrador de tensiones.
- **Fractura:** Separación física de un material en dos o más partes debido a la sobrecarga mecánica (estática o cíclica).
- **Tracción:** Esfuerzo generado por fuerzas que estiran un material a lo largo de su eje longitudinal, produciendo alargamiento y reducción de área transversal.
- **Axial:** Dirección de una fuerza o esfuerzo que actúa paralela al eje longitudinal de un componente.
- **Multiaxial:** Estado de esfuerzo donde actúan múltiples componentes tensionales simultáneamente (ej: tracción + torsión + flexión). Es crítico en fatiga porque acelera la propagación de grietas.
- **Flexión alternativa:** Carga cíclica que invierte su dirección en cada ciclo, generando esfuerzos de tracción y compresión alternantes en la misma sección del material.
- **Esfuerzo:** Fuerza interna por unidad de área (N/mm^2) que resiste un material ante una carga externa.
- **Momento:** Producto de una fuerza por la distancia perpendicular a un eje de referencia. En flexión, causa curvatura en vigas o ejes.
- **Cortante:** Esfuerzo que induce deslizamiento interno entre planos paralelos de un material. Común en pernos, soldaduras o vigas cortas.

- **Carga:** Fuerza externa aplicada a un material o estructura. Puede ser estática (constante) o dinámica (variable en el tiempo).

9. FASE 6. ESTABLECER LAS MEDIDAS MÍNIMAS DE SEGURIDAD PARA EL DESARROLLO DE LOS ENSAYOS POR MEDIO DE UN LISTADO DE NORMAS DE SEGURIDAD.

9.1. NORMAS DE SEGURIDAD EN LABORATORIOS ESCUELA INGENIERÍA MECÁNICA

9.1.1. Indumentaria de laboratorio reglamentaria

Vestir con ropa tradicional, teniendo en cuenta que no debe llevar mangas amplias, cinturones sueltos, pantalones cortos, sandalias, bufandas, trapos colgando en los bolsillos, joyería como anillos, reloj o cadenas, entre otros elementos que puedan ser origen de accidentes al engancharse la ropa en partes móviles de máquinas, o provocar caídas en el caso del calzado inadecuado.

9.1.2. RIESGO ELÉCTRICO (RETIE (Resolución 40117 de 2024), 2024)

Al momento realizar los ensayos en la maquina de fatiga multiaxial se debe tener especial cuidado en la operación y puesta en marcha de la máquina, las operaciones en el tablero principal deben ser ejecutadas de manera segura siguiendo las indicaciones del reglamento técnico de instalaciones eléctricas RETIE.

9.1.3. Riesgo de atrapamiento

La maquina de fatiga multiaxial deberá siempre operar con la guarda cerrada, ya que esto mitiga el riesgo de atrapamiento y contacto con partes móviles de la máquina, así como estipula la resolución 2044 de 1979 en su CAPÍTULO I. DE LAS MAQUINAS HERRAMIENTA Y MAQUINAS INDUSTRIALES, ARTÍCULO 267. Los órganos móviles de las máquinas, motores, transmisiones, las piezas salientes y cualquier otro elemento o dispositivo mecánico que presente peligro para los trabajadores, deberán ser provistos de la

adecuada protección por medio de guardas metálicas o resguardos de tela metálica que encierre estas partes expuestas a riesgos de accidente.

10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

- La adopción de criterios de fatiga multiaxial (Findley, Sines, Crossland) para sollicitaciones mecánicas de flexión rotativa y flexión alternativa aplicadas al mismo tiempo asegura la validez de los resultados, posibilitando la construcción de curvas S–N y el análisis de vida útil de materiales en condiciones de servicio más realistas.
- La elaboración de la Norma Técnica de Ensayo de Fatiga Multiaxial permitió consolidar un documento formal que integra desde la preparación de probetas hasta el registro de resultados, aportando al fortalecimiento de la investigación en la Escuela de Ingeniería Mecánica.
- La integración de normas internacionales (ASTM, ISO) con normativas nacionales (Icontec, RETIE, Resolución 2044 de 1979) facilitó la creación de un marco normativo aplicable en Colombia, alineado con estándares de seguridad y calidad internacional.
- Este trabajo constituye un aporte pionero en la normalización de ensayos de fatiga multiaxial en el país, brindando herramientas para el avance científico y la colaboración con sectores productivos como la aeronáutica, automoción y energía.
- La fatiga multiaxial revela la verdadera complejidad de los sistemas mecánicos y nos recuerda que la ingeniería no puede reducirse a simplificaciones uniaxiales. Comprenderla significa diseñar con visión integral, aceptando que la seguridad, la eficiencia y la innovación dependen de reconocer cómo interactúan múltiples esfuerzos en la realidad operativa de cada componente.

RECOMENDACIONES

- Validar experimentalmente la norma en una variedad más amplia de materiales (aceros, aluminios y compuestos), con el fin de robustecer su aplicabilidad en diferentes campos de ingeniería.
- Promover la oficialización de la norma ante Icontec para convertirla en un referente nacional y abrir la posibilidad de su adopción en proyectos industriales y académicos.
- Implementar programas de capacitación dirigidos a estudiantes e investigadores que utilicen la máquina de fatiga multiaxial, garantizando el correcto uso de la norma y la adecuada interpretación de los resultados.

BIBLIOGRAFÍA

- Colombia, M. d. (2024). *Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas*.
- Crossland, B. (1956). Effect of mean stress on fatigue of metals subject to combined torsion and axial load or bending. *Journal of the Institute of Metals*.
- Ellyin, F. (1997). *Fatigue Damage, Crack Growth and Life Prediction*. . Chapman & Hall.
- Findley, W. N. (1959). A theory for the effect of mean stress on fatigue of metals under combined torsion and axial load or bending. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 81 (61–67).
- Glinka, G. (1989). *Energy approach in fatigue: theory and applications*. . Pergamon Press.
- Hu, Z. B. (2019). The strain energy density to estimate lifetime of notched components subjected to variable amplitude fatigue loading. . *Frattura ed Integrità Strutturale*.
- ICONTEC. (1995). *NTC -2*.
- Industry, D. (2020). *Direct Industry*. Obtenido de Productos máquinas de ensayos.: <https://www.directindustry.es/prod/ta-instruments/product-38477-1710585.html>
- International, A. (2021). *ASTM E466-21 Standard practice for conducting force controlled constant amplitude axial fatigue tests of metallic materials*.
- PERTUZ, A. (2016). *UIS Patente n° WO2018116092*.
- Ritchie, R. O. (1999). *Mechanisms of fatigue-crack propagation in ductile and brittle solids*.
- Roell, Z. (2021). *Zwick Roell*. Obtenido de <https://www.zwickroell.com/es/productos/maquinas-de-ensayos-dinamicos-y-de-fatiga/maquinas-de-ensayo-servohidraulicas/maquina-de-ensayos-de-alta-velocidad-htm/>
- Sines, G. (1959). Behavior of metals under complex static and alternating stresses. . *Journal of the Franklin Institute*.
- Smith, K. N. (1970). A stress-strain function for the fatigue of metals. . *Journal of Materials*.
- Standardization, I. O. (2012). *ISO/TR 12112*.
- Susmel, L. &. (2019). The strain energy density to estimate lifetime of notched components subjected to variable amplitude fatigue loading. *Frattura ed Integrità Strutturale*.