



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA METROLÓGICO DE ACUERDO A LA NORMA
NTE INEN ISO 5725-6 PARA ENSAYOS DE TENSIÓN DE ACERO DE BAJA
ALEACIÓN MEDIANTE UNA CELDA DE CARGA DE 15 TONELADAS**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero Mecánico

AUTOR: JONATHAN ALEXANDER TOBAR VIVAS

TUTOR: EDUARDO XAVIER VACA MICHILENA

Quito – Ecuador

2024

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Jonathan Alexander Tobar Vivas con documento de identificación N.º 1718047572 manifesté que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizó a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 23 de febrero de 2024

Atentamente,



Jonathan Alexander Tobar Vivas
1718047572

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Yo, Jonathan Alexander Tobar Vivas con documento de identificación N.º 1718047572, expresé mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Proyecto Técnico: “Implementación de un sistema metrológico de acuerdo a la norma NTE INEN ISO 5725-6 para ensayos de tensión de aceros de baja aleación mediante una celda de carga de 15 toneladas”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento en el que haga la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 23 de febrero de 2024

Atentamente,



Jonathan Alexander Tobar Vivas
1718047572

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Eduardo Xavier Vaca Michilena con documento de identificación N.º 1721078424, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA METROLÓGICO DE ACUERDO A LA NORMA NTE INEN ISO 5725-6 PARA ENSAYOS DE TENSIÓN DE ACEROS DE BAJA ALEACIÓN MEDIANTE UNA CELDA DE CARGA DE 15 TONELADAS, realizado por Jonathan Alexander Tobar Vivas con documento de identificación N.º 1718047572, obtenido como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 23 de febrero de 2024

Atentamente,



Ing. Eduardo Xavier Vaca Michilena MSc.

1721078424

DEDICATORIA

El proyecto de titulación está dedicado a mis padres Mónica Vivas y José Tobar, quienes me apoyaron incondicionalmente en este largo trayecto, estuvieron pendientes de mí y me motivaron a continuar pese a los obstáculos que surgieron durante el camino.

A mi familia que deposito su confianza y sus mejores anhelos para seguir adelante y brindarme motivación y poder culminar con éxito este objetivo académico.

AGRADECIMIENTO

Agradezco al Ing. Eduardo Xavier Vaca Michilena, que me acompañó en todo este proceso como tutor de tesis y como un gran amigo, aportando con todos sus conocimientos, orientación y con el seguimiento necesario desde el inicio hasta la culminación de esta implementación metrológica.

A la Universidad Politécnica Salesiana, Facultad de ingenierías, Carrera de ingeniería Mecánica y de igual manera a los docentes que me impartieron todos sus conocimientos.

INDÍCE

DEDICATORIA.....	V
AGRADECIMIENTO.....	VI
INDÍCE	VII
Índice de tablas.....	X
Índice de figuras.....	XII
RESUMEN.....	XIII
ABSTRACT	XIV
INTRODUCCIÓN	1
Problema de estudio	2
Justificación.....	2
Objetivos	3
Objetivo general	3
Objetivos específicos.....	3
CAPÍTULO I.....	5
MARCO TEÓRICO	5
1.1 Estado del arte	5
1.2 Aspectos teóricos de la investigación.....	8
1.2.1 <i>Máquina de prueba universal</i>	8
1.2.2 <i>Importancia de las maquinas universales de ensayos</i>	13
1.2.3 <i>Tipos de máquinas universales de ensayo</i>	13
1.2.4 <i>Máquina de ensayo electromecánico universal</i>	14
1.2.4.1 Ventajas de MUE Electromecánica.	15
1.2.5 <i>Tipos de comportamientos del material</i>	16
1.2.6 <i>Proceso de ruptura</i>	17
1.3 Aspecto metrológico.....	19

1.3.1	<i>Aseguramiento metrológico</i>	19
1.3.2	<i>Parámetros de aseguramiento que intervienen en el ensayo de tensión</i>	21
1.3.3	<i>Exactitud del proceso</i>	26
1.3.3.1	Prueba de Tukey.	26
1.3.3.2	Determinación de límites.	27
CAPÍTULO II		31
METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....		31
2.1	Desarrollo del aseguramiento metrológico.....	31
2.1.1	<i>Trazabilidad</i>	31
2.1.2	<i>Calibración</i>	33
2.1.2.1	Calibración de máquina de ensayo universal Testresources.	33
2.1.2.2	Proceso de calibración.	33
2.1.2.3	Resultados de calibración de la MUE.	34
2.1.2.4	Evaluación de resultados.....	36
2.1.3	<i>Ensayo de tensión</i>	39
2.1.4	<i>Máquina de ensayos universal MUE</i>	39
2.1.5	<i>Probetas de acero AISI 4340</i>	40
2.1.5.1	Acero AISI/SAE 4340.	41
2.1.5.2	Fabricación de probeta.	42
2.1.6	<i>Configuración de software</i>	42
2.1.7	<i>Resultados gráficos del ensayo de tracción</i>	45
2.1.8	<i>Los resultados numéricos del análisis de tracción</i>	46
CAPÍTULO III		51
ANÁLISIS DE RESULTADOS		51
3.1	Generalidades	51
3.2	Análisis de ANOVA.....	51

3.3	Límite de precisión intermedia	53
3.4	Prueba de Tukey	56
3.5	Límites de control	57
3.6	Hoja de datos	59
3.7	Gráfica de control	62
	Conclusiones	63
	Recomendaciones.....	65
	Lista de Referencias	67
	Anexos.....	70

Índice de tablas

Tabla 1. <i>Tabla de componentes básicos de máquinas de ensayo</i>	10
Tabla 2. <i>Clases de pruebas en máquinas universales</i>	11
Tabla 3. <i>Parámetros de las máquinas de ensayo universal</i>	12
Tabla 4. <i>Tipos de máquinas de ensayo</i>	14
Tabla 5. <i>Ventajas de MUE electromecánica</i>	15
Tabla 6. <i>Datos para ANOVA</i>	22
Tabla 7. <i>Factor de Tukey</i>	27
Tabla 8. <i>Coefficientes para calcular la línea central y los límites de acción</i>	29
Tabla 9. <i>Coefficientes para calcular los límites de advertencia</i>	29
Tabla 10. <i>Resultados certificado calibración LFUE-23-023-MUN. Sistema internacional</i> ...	35
Tabla 11. <i>Resultados de calibración LFUE-23-023-MUN sistema inglés</i>	35
Tabla 12. <i>Conformidad de resultados de calibración</i>	36
Tabla 13. <i>Ficha técnica máquina universal de ensayos Test Resources</i>	39
Tabla 14. <i>Puntos de configuración de software</i>	40
Tabla 15. <i>Propiedades mecánicas del acero AISI/SAE 4340</i>	41
Tabla 16. <i>Propiedades físicas acero AISI/SAE 4340</i>	42
Tabla 17. <i>Resultados ensayo de tracción grupo 1</i>	47
Tabla 18. <i>Resultados ensayo de tracción grupo 2</i>	47
Tabla 19. <i>Resultados ensayo de tracción grupo 3</i>	48
Tabla 20. <i>Resultados ANOVA carga máxima</i>	52
Tabla 21. <i>Resultados ANOVA esfuerzo máximo</i>	52
Tabla 22. <i>Resultados ANOVA módulo de elasticidad</i>	52
Tabla 23. <i>Resultados ANOVA deformación axial</i>	53
Tabla 24. <i>Límite de precisión carga máxima</i>	54
Tabla 25. <i>Límite de precisión esfuerzo máximo</i>	54
Tabla 26. <i>Límite de precisión de módulo de elasticidad</i>	55
Tabla 27. <i>Límite de precisión de deformación axial</i>	55
Tabla 28. <i>Evaluación de Tukey para carga máxima</i>	56
Tabla 29. <i>Evaluación de Tukey para esfuerzo máximo</i>	56
Tabla 30. <i>Evaluación de Tukey para módulo de elasticidad</i>	57
Tabla 31. <i>Evaluación de Tukey para deformación axial</i>	57

Tabla 32. <i>Límite de control de carga máxima</i>	58
Tabla 33. <i>Límite de control de esfuerzo máximo</i>	58
Tabla 34. <i>Límite de control de módulo de elasticidad</i>	58
Tabla 35. <i>Límite de control de deformación axial</i>	59

Índice de figuras

Figura 1. <i>Máquina universal de ensayos electromecánica</i>	9
Figura 2. <i>Máquina de ensayo electromecánica</i>	15
Figura 3. <i>Flujograma del proceso de ruptura</i>	18
Figura 4. <i>Componentes claves del aseguramiento metrológico</i>	20
Figura 5. <i>Carta de trazabilidad</i>	32
Figura 6. <i>Transductor de fuerza patrón</i>	33
Figura 7. <i>Calibración de MUE con transductor patrón</i>	34
Figura 8. <i>Resultado de calibración de la MUE</i>	34
Figura 9. <i>Gráfico de resultados de calibración</i>	37
Figura 10. <i>Flujograma del proceso de calibración de la máquina TESTRESOURCES</i>	38
Figura 11. <i>Dimensiones de la probeta circular</i>	41
Figura 12. <i>Maquinado de probeta</i>	42
Figura 13. <i>Ajustes de probetas dentro software especializado</i>	43
Figura 14. <i>Configuración del software para la carga en comparación con la posición</i>	43
Figura 15. <i>Configuración del avance y toma de datos dentro del software especializado</i>	44
Figura 16. <i>Probeta</i>	45
Figura 17. <i>Distancia de la probeta en la máquina para ensayos a tracción</i>	45
Figura 18. <i>Gráfica carga vs posición</i>	46
Figura 19. <i>Proceso de ensayo de ruptura</i>	50
Figura 20. <i>Información del estudio</i>	60
Figura 21. <i>Sección 2 de hoja de control</i>	61
Figura 22. <i>Sección 2 de hoja de control 3</i>	61
Figura 23. <i>Gráfico de límites de control</i>	62

RESUMEN

Este proyecto de investigación se centra en la importancia de la metrología en los ensayos de tracción de aceros de baja aleación, específicamente el AISI 4340. La exactitud y precisión de las mediciones son cruciales para evaluar con precisión las propiedades mecánicas de estos materiales, lo que impacta en la seguridad y durabilidad de las estructuras y productos que los utilizan. La norma NTE INEN ISO 5725-6 se establece como un marco de referencia fundamental para garantizar la reproducibilidad y repetibilidad en los ensayos de tracción, lo que asegura que diferentes laboratorios obtengan resultados comparables y confiables al utilizar los mismos métodos y equipos de medición. Para garantizar que los equipos de medición mantengan su precisión a lo largo del tiempo, es necesario implementar un sistema de aseguramiento metrológico, que incluye la calibración de la máquina de ensayo universal y la evaluación de los resultados de la calibración. Los resultados de calibración que han sido certificados ofrecen una base sólida para la validez de los ensayos. El análisis de los ensayos de tracción muestra la variabilidad mecánica del acero AISI 4340. Se utiliza el análisis de varianza (ANOVA) para evaluar si existen diferencias significativas entre los resultados. Este análisis contribuye a establecer límites de precisión intermedia para futuros ensayos, permitiendo monitorear y verificar el cumplimiento de las características determinadas para el material.

Palabras Clave: metrología, mecánica de materiales, ensayos de tracción, acero de baja aleación

ABSTRACT

This research project focuses on the importance of metrology in tensile testing of low alloy steels, specifically AISI 4340. The accuracy and precision of measurements are crucial to accurately assess the mechanical properties of these materials, which impacts the safety and durability of structures and products that use them. The NTE INEN ISO 5725-6 standard is established as a fundamental reference framework to guarantee reproducibility and repeatability in tensile tests, which ensures that different laboratories obtain comparable and reliable results when using the same measurement methods and equipment.

To ensure that measuring equipment maintains its accuracy over time, it is necessary to implement a metrological assurance system, which includes calibration of the universal testing machine and evaluation of the calibration results.

Calibration results that have been certified provide a solid basis for the validity of the tests. The analysis of the tensile tests shows the mechanical variability of AISI 4340 steel. Analysis of variance (ANOVA) is used to evaluate if there are significant differences between the results. This analysis helps to establish intermediate precision limits for future tests, allowing to monitor and verify compliance with the characteristics determined for the material.

Keywords: metrology, materials mechanics, tensile testing, low alloy steel

INTRODUCCIÓN

En el amplio campo de la mecánica de materiales, la exactitud y precisión de las mediciones de propiedades son esencial. Los aceros de baja aleación han ganado importancia en diversas aplicaciones industriales debido a su combinación de resistencia, ductilidad y resistencia a la corrosión. Para utilizar eficazmente estas propiedades es muy importante obtener mediciones precisas y fiables, especialmente en ensayos de tracción, que proporcionan información sobre la resistencia y capacidad de deformación del material. Las pruebas de tracción implican someter una muestra de material a tensión unilateral hasta que se produzca la falla [1].

La naturaleza de esta falla y las cargas y tensiones registradas durante las pruebas proporcionan información valiosa sobre las propiedades mecánicas del material. Dada la importancia de estos datos en aplicaciones de diseño e ingeniería, el equipo utilizado para realizar estas pruebas debe tener la mayor precisión y confiabilidad. Aquí se utiliza una célula de carga calibrada hasta 15 toneladas. Como herramienta de metrología, es capaz de medir fuerzas extremadamente grandes con alta precisión. Sin embargo, no basta con tener un equipo de calidad. Los métodos utilizados para verificar su funcionamiento y calibración son tan importantes como el sistema de metrología subyacente.

La norma NTE INEN ISO 5725-6 se convierte en la principal norma de metrología que se centra en la precisión de los métodos y resultados de medición. Esto se refiere a la reproducibilidad y repetibilidad, que son dos aspectos fundamentales de cualquier sistema de medición (NTE INEN ISO 5725-6, 1994). En los ensayos de tracción, garantizar la reproducibilidad y la repetibilidad significa que diferentes laboratorios que utilicen los mismos métodos y equipos deben lograr resultados iguales y comparables [2].

Una apuesta por la excelencia en la medición es la implementación de un sistema de metrología basado en la norma NTE INEN ISO 5725-6. Esto significa datos más precisos y confiables para los ensayos de tracción de aceros de baja aleación; esto puede tener un impacto directo en la

seguridad, durabilidad y eficiencia de las estructuras y productos que utilizan estos aceros. Sin embargo, el desafío era integrar efectivamente el estándar con el funcionamiento de la celda de carga calibrada hasta 15 t. Los protocolos de calibración, los métodos de prueba y la capacitación del personal son solo algunos de los aspectos que deben gestionarse cuidadosamente para cumplir con los estándares.

En conclusión, la caracterización de los aceros de baja aleación depende principalmente de la mecánica de los materiales, particularmente de los ensayos de tracción. Para un entorno más claro y sostenible, la implementación de un sistema de ensayos de tracción basado en la norma NTE INEN ISO 5725-6, particularmente utilizando células de carga calibradas, es un paso hacia resultados más seguros y precisos.

Problema de estudio

Los ensayos de tensión son una herramienta fundamental en la ingeniería y la industria para evaluar la resistencia de los materiales y determinar su comportamiento bajo cargas externas. Sin embargo, es esencial asegurar la exactitud del proceso y de los resultados obtenidos en estos ensayos, ya que cualquier error podría tener consecuencias catastróficas. Muchas de las herramientas estadísticas utilizadas conllevan realizar varios ensayos buscando obtener y mejorar el proceso utilizado para el ensayo, es así que utilizando estas técnicas es posible obtener resultados confiables, así mejorando la calidad de los resultados independientemente del personal que lo realice.

Justificación

La exactitud de un sistema de medición en ciencia, ingeniería y estadística es el grado de acercamiento de las medidas de una cantidad al verdadero valor de esa cantidad. La reproducibilidad y la repetibilidad son conceptos que se relacionan con la precisión de un sistema de medición. La reproducibilidad es el grado en que la repetición de una medición en

diferentes condiciones produce los mismos resultados. Aunque en el lenguaje coloquial, las palabras precisión y exactitud pueden parecer sinónimos, en la práctica científica tienen significados distintos [3].

En la actualidad, existen métodos para determinar la exactitud y precisión que todos los laboratorios certificados deben cumplir. Uno de estos métodos es la carta de control, que es una herramienta de calidad porque permite monitorear todos los procesos que muestran la exactitud y precisión de todos los miembros del laboratorio, evaluando sus resultados a partir de un patrón de resultados que sirve como testigo [4]. La exactitud en instrumentación industrial se refiere a la tolerancia de una medición o transmisión de un instrumento y establece los límites de los errores cometidos durante el funcionamiento normal del instrumento [5]. A través del examen de su repetitividad y reproducibilidad, donde se examinan tanto el instrumento como el evaluador; de manera teórica, esto se examina utilizando cálculos de errores en la medida (error absoluto, relativo y aleatorio).

Objetivos

Objetivo general

Implementar un sistema metrológico de acuerdo a la norma NTE INEN ISO 5725-6 para ensayos de tensión de aceros de baja aleación mediante una celda de carga de 15 toneladas.

Objetivos específicos

- Identificar los requisitos técnicos y normativas necesarias para la implementación de un sistema metrológico en ensayos de tensión de aceros de baja aleación mediante una celda de carga de 15 toneladas.
- Comparar los parámetros de ajuste de la celda de carga de 15 toneladas mediante el uso de patrones para la correcta calibración del equipo.

- Definir parámetros de repetibilidad y reproducibilidad en probetas de acero AISI 4340 para los ensayos de tensión.
- Analizar los resultados de los ensayos de tensión mediante reglas establecidas en la norma NTE INEN ISO 5725-6 para la implementación de un sistema metrológico.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1 Estado del arte

En las últimas décadas, el aseguramiento metrológico ha tomado protagonismo en el campo mecánico, particularmente en las pruebas de materiales. Los avances tecnológicos y los requisitos industriales han aumentado la necesidad de mediciones precisas y confiables, especialmente en ensayos de tracción de aceros de baja aleación. En la investigación realizada por Robles y Del Campo [6] realizaron un análisis del panorama actual sobre la presencia y aplicación de la metrología, titulada “La metrología, motor de innovación y desarrollo industrial”, el cual insiste en que una evaluación exhaustiva es necesaria para cuantificar y justificar la necesidad de una infraestructura metrológica sólida en cada nación.

La realización de esta evaluación requiere una gran cantidad de tiempo, recursos financieros y conocimientos especializados. Menciona el informe del Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM), que resume resultados de estudios importantes de instituciones destacadas como NIST (EE. UU.), DTI (Reino Unido), NRC (Canadá) y la Unión Europea [6]. Cada estudio utilizó un presupuesto económico distinto. Por ejemplo, el NIST centró su análisis en comparar el costo de desarrollo de estándares de medida específicos y los ahorros estimados para determinados usuarios industriales. Un hallazgo revelador de su estudio fue que potencialmente se podrían ahorrar entre 10 y 30 mil millones de dólares anualmente si las medidas métricas fueran consistentes y confiables. Por su parte, la investigación del DTI, basada en macroeconomía, evidenció que las mediciones en el Reino Unido influyen en su economía en un estimado del 0,8% del PIB.

De forma general, este estudio demuestra la influencia positiva y crucial de la metrología en la infraestructura económica y tecnológica de las naciones industrializadas modernas. Los aceros de baja aleación se caracterizan por tener el menor contenido de elementos de aleación, a excepción del carbono. Su versatilidad y equilibrio entre resistencia y flexibilidad los

convierten en los materiales más populares para una variedad de aplicaciones industriales. Su uso creció exponencialmente a lo largo del siglo XX, desde estructuras de construcción hasta piezas de automóviles.

Pero con este aumento surge la necesidad de garantizar que las propiedades reportadas de estos aceros sean realmente las esperadas. Esto hace que la implementación de pruebas de tracción precisas sea fundamental [7].

De hecho, su misma naturaleza ha dado paso a varias aplicaciones en el campo industrial uno de estos casos se menciona en el estudio de Parodi et al., [8] siendo este el caso de la corrosión, un fenómeno que puede causar daños severos en componentes esenciales de la industria del gas y petróleo, requiere atención y soluciones efectivas para garantizar la operatividad, seguridad y sostenibilidad de estas industrias. Esta preocupación se intensifica especialmente en condiciones extremas, donde los ambientes altamente agresivos, repletos de ácido sulfhídrico, dióxido de carbono, cloruros y azufre elemental, someten a los materiales a niveles elevados de estrés, altas temperaturas y presiones.

La corrosión bajo tensión en ácido sulfhídrico (SSC), la fisuración inducida por hidrógeno (HIC) y la fisuración inducida por hidrógeno orientada por tensión (SOHIC) son mecanismos de degradación que ponen en peligro la integridad estructural. No obstante, gracias a los avances en tecnología e investigación, los aceros de baja aleación han surgido como una opción clave. Estos aceros, diseñados para resistir tales condiciones adversas, se han convertido en el material preferido en muchas aplicaciones en la industria porque ofrecen no solo resistencia a la corrosión, sino también una combinación equilibrada de durabilidad y costo-eficacia. Las empresas pueden enfrentar los desafíos de la corrosión, reducir los costos asociados y garantizar un funcionamiento seguro y eficiente en entornos cada vez más difíciles al adoptar estos materiales.

Métodos de precisión en pruebas de tracción: en metrología, la "precisión" se refiere a la

cercanía del valor medido al valor real. Los ensayos de tracción requieren precisión para determinar características como el límite elástico, la resistencia última, etc. Durante la segunda mitad del siglo XX, los científicos se dieron cuenta de que era necesario un método estandarizado para garantizar la precisión de estas mediciones. Esto se debe a que es importante predecir cómo los materiales reaccionarán ante cargas reales [5].

Aseguramiento metrológico y su cumplimiento: el aseguramiento metrológico se refiere a un conjunto de procedimientos y protocolos diseñados para asegurar la validez de las mediciones. El objetivo de integrar los sistemas de metrología en las pruebas de tracción es garantizar que los datos obtenidos sean precisos (precisión de las mediciones) y exactos (cerca de los valores reales). Para los aceros de baja aleación, esta garantía significa confianza en su rendimiento, lo que afecta directamente a su idoneidad y seguridad en el mundo real.

La importancia de la relación entre la precisión que proporciona un sistema metrológico para ensayos en aceros se puede ver claramente en el trabajo de Chin [3] en su Plan de calidad para el aseguramiento metrológico para la certificación de lotes de cilindros de acero de 15 kg para envasar GLP en Inserment S.A., donde explica la importancia de que las empresas cuenten con un aseguramiento de este tipo para garantizar las respectivas necesidades del laboratorio de certificación, satisfacer las necesidades de medición y la calidad del producto, y de esta manera mejorar la forma de gestión de Inserment S.A.

Y de esta manera pone a disposición de la entidad material científico y técnicamente confiable, unificando conceptos de trazabilidad, incertidumbre, calibración y otros. A medida que la industria y el mundo académico reconocen la importancia de la seguridad metrológica, han surgido diversas regulaciones y directrices técnicas para estandarizar los procedimientos y equipos utilizados. Estas normas cubren no sólo aspectos técnicos sino también protocolos de calibración, mantenimiento y verificación de equipos de medición [9].

El análisis de exactitud en operaciones o métodos aplicados a ensayos de tracción son muy comunes y más cuando son aplicados en aceros de baja aleación ya que son los más comunes

por sus características y su valor comercial y sus propiedades, por lo que es indispensable conocer que aspectos metroológicos influyen cuando se realiza esta actividad, los parámetros que son representativos que intervienen como una duda o incertidumbre en este proceso es la repetibilidad y la reproducibilidad. Estos resultados cambian dependiendo del material y la máquina de ensayo utilizada ya que cuentan con propiedades y rangos específicos, contando siempre con la calibración de la máquina que es un factor importante dentro del aspecto metroológico. Al comparar el desempeño del material mediante la esquematización de los resultados obtenidos mediante la ruptura, se obtiene información la cual puede ser analizada estadísticamente y comparada con parámetros específicos para el método de ensayo a implementar.

En conclusión, los requisitos previos para la implementación de la garantía metroológica para los ensayos de tracción de aceros de baja aleación destacan el desarrollo para satisfacer las necesidades académicas e industriales. La trayectoria histórica muestra un esfuerzo constante por proporcionar mediciones de calidad que enfatizan el valor de la precisión y la confiabilidad para comprender y usar estos aceros en una variedad de aplicaciones. Esta tendencia demuestra una vez más la necesidad de métodos sólidos y estandarizados que respalden el diseño y las decisiones de aplicación de ingeniería modernas.

1.2 Aspectos teóricos de la investigación

1.2.1 Máquina de prueba universal

Una máquina de ensayo en ingeniería es una que se utiliza para investigar las propiedades de los materiales. Es posible realizar pruebas donde los elementos son sometidos a tracción, compresión o flexión, los mismos que se sujetan a mordazas antes de aplicar carga. Las máquinas universales de ensayo representan una herramienta esencial en el campo de la investigación y control de calidad de materiales. Estas máquinas, diseñadas para someter a probetas a diferentes tipos de esfuerzos como tracción, compresión, flexión y torsión, permiten determinar propiedades mecánicas fundamentales de diversos materiales. Al

proporcionar datos precisos sobre la resistencia, ductilidad, elasticidad y otros parámetros relevantes, facilitan la toma de decisiones en diseño, fabricación y aplicaciones en ingeniería. La razón por la que son llamados "universales" es porque son capaces de realizar una amplia gama de ensayos, adaptándose a las necesidades específicas de cada estudio o industria. Estas máquinas son cruciales para garantizar que los materiales cumplan con las especificaciones y estándares requeridos en un mundo donde la integridad y durabilidad de los materiales es importante. Con el fin de ampliar esta situación, una máquina de ensayo universal ha sufrido múltiples transformaciones y se ha adaptado a nuevas tecnologías y necesidades para satisfacerlas. La primera máquina de ensayo fue elaborada por Mannheimer Maschinenfabrik (MFL) Figura 1., se visualiza el modelo implantado;

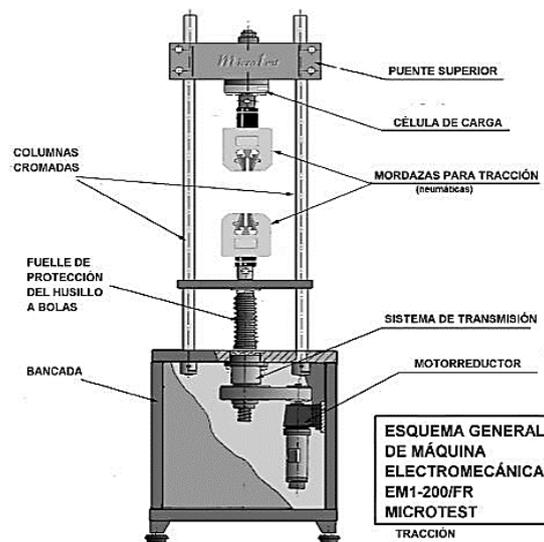


Figura 1. Máquina universal de ensayos electromecánica [9]

Las máquinas de ensayo universales (MUE), también conocidas como máquinas de ensayo, son un componente fundamental de la ingeniería mecánica y de una variedad de campos de la ciencia de los materiales. Dado que brindan la capacidad de evaluar una amplia gama de propiedades mecánicas y propiedades de los materiales, estas herramientas versátiles se utilizan con frecuencia en investigación, desarrollo y control de calidad de materiales y componentes [10]. Una máquina de prueba universal es principalmente un dispositivo cuidadosamente diseñado para aplicar fuerzas controladas y precisas a una muestra de prueba para evaluar cómo responde a esas fuerzas. Es importante destacar que estas máquinas se

denominan "universales" porque son capaces de realizar una variedad de pruebas mecánicas en una sola plataforma, lo que las hace extremadamente versátiles en comparación con equipos de prueba más especializados. Existen diferentes tipos de máquinas de prueba, cada una diseñada para un tipo específico de prueba. La capacidad de estas máquinas para proporcionar datos precisos sobre resistencia, elasticidad, deformación y otras características importantes hace que las pruebas sean un pilar fundamental para garantizar que los materiales cumplan con las regulaciones y estándares de calidad requeridos en diversas industrias. Una característica distintiva de MUE es su capacidad para aplicar cargas controladas en etapas, lo que permite un registro preciso de la respuesta del material en diversos niveles de tensión y deformación. Además, estas máquinas suelen estar equipadas con sistemas de medición altamente sensibles, como extensómetros y células de carga, que capturan datos precisos sobre las deformaciones y las fuerzas aplicadas durante las pruebas [11].

Las máquinas de ensayo universales, también conocidas como máquinas de ensayo de materiales o máquinas de ensayo mecánico, son herramientas indispensables en la tecnología de materiales y la mecánica. Su diseño y funcionamiento se basan en principios mecánicos fundamentales y permiten una evaluación precisa de las propiedades mecánicas de diversos materiales [12].

1. Operaciones básicas: Las máquinas de prueba universales funcionan aplicando fuerzas controladas a muestras de materiales. La fuerza se aplica gradualmente y la deformación resultante se registra y analiza. En la Tabla 1. se detallará las pruebas mecánicas de operación.

Tabla 1. Tabla de componentes básicos de máquinas de ensayo [13]

Pruebas mecánicas	Descripción	Tipos
Mecanismo de carga	Este sistema se encarga de aplicar la carga a la muestra	Hidráulico, mecánico y neumático

Mecanismo de medición	Este componente mide la deformación experimentada por la muestra durante la prueba	Extensómetros, medidores de desplazamiento o los sensores de fuerza.
Software de control y adquisición de datos	la mayoría de los equipos modernos incluyen software que le permite configurar parámetros de prueba	Controlar cargas y registrar datos con precisión

2. Tipos de resistencias: Los equipos de prueba universales son versátiles y permiten una variedad de pruebas, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Clases de pruebas en máquinas universales [14]

Tipos de prueba	Descripción	Análisis
Prueba de tracción	Estas pruebas evalúan la resistencia a la tracción de un material cuando se somete a tensión axial. (La muestra se estira gradualmente hasta fallar)	Permite medir propiedades como el límite elástico y la resistencia máxima.
Prueba de compresión	La prueba de carga de compresión axial se aplica a la probeta.	Determinar la resistencia a la compresión del material y su capacidad para soportar cargas de compresión
Prueba de flexión	La prueba de flexión se lleva a cabo para evaluar la resistencia y la rigidez de una muestra al someterla a fuerzas de flexión.	Son esenciales para comprender cómo se comportan los materiales en aplicaciones estructurales

3. Parámetro promedio: Como se muestra en la Tabla 3., el equipo de prueba universal puede medir una variedad de parámetros.

Tabla 3. Parámetros de las máquinas de ensayo universal

Denominación	Unidad	Características
Fuerza	newtons (N)	Carga sobre la muestra
Deformación	milímetros (mm)	Extensión, compresión o flexión
Esfuerzo	Mega Pascal (MPa)	Esfuerzo de material sobre unidad de área
Deformación unitaria	mm/mm	deformación relativa a la longitud original de la muestra

4. Reglas y estándares: Para garantizar la precisión y coherencia de las mediciones, regulaciones y estándares (como los publicados por ASTM International), se establecen procedimientos y requisitos específicos para la calibración y operación de equipos de prueba universales [15]. El Universal Tester es una herramienta esencial para la investigación y la industria en ingeniería. Su diseño y funcionamiento se basan en principios mecánicos y pueden evaluar una variedad de propiedades mecánicas de los materiales, lo que es esencial para el desarrollo y aplicación de materiales en una variedad de contextos [16].
5. Innovaciones Tecnológicas: A lo largo de las décadas, la máquina universal de ensayos ha experimentado avances significativos gracias a la tecnología. Estas innovaciones han ampliado su capacidad para realizar ensayos más complejos y obtener datos con mayor precisión. Algunos de estos avances incluyen:
 - Sensores avanzados: La integración de sensores de alta precisión ha mejorado la capacidad de medir fuerzas y deformaciones con una precisión nunca antes vista. Estos sensores pueden detectar cambios minúsculos en la carga y la deformación, lo que es esencial para evaluar materiales altamente sensibles.
 - Control por computadora: La incorporación de sistemas de control por computadora ha permitido una manipulación más precisa de la carga y una mayor

automatización de los ensayos. Esto no solo reduce la intervención humana, sino que también proporciona resultados más consistentes [17].

1.2.2 Importancia de las máquinas universales de ensayos

Su importancia radica en su capacidad indispensable para evaluar y comprender las propiedades mecánicas de materiales y componentes, lo que genera una cadena de beneficios significativos en áreas clave de la investigación y la industria. Los MUE son necesarios para evaluar la resistencia, la durabilidad y el rendimiento de los componentes que componen una amplia gama de productos, desde vehículos hasta dispositivos médicos, en el diseño y desarrollo de productos de ingeniería mecánica. Esto permite a los ingenieros tomar mejores decisiones al diseñar y elegir materiales, lo que resulta en productos más seguros y eficientes [18].

Las pruebas realizadas en estas máquinas garantizan que los productos cumplan con las especificaciones y regulaciones requeridas, evitando fallas y problemas de seguridad que pueden generar costosas devoluciones o quejas [19]. En la investigación en ciencia de materiales, los MUE son herramientas fundamentales de investigación de materiales. Esto es fundamental para garantizar la seguridad del producto y proteger al público. Investigación interdisciplinaria. Además de la ingeniería mecánica y la ciencia de materiales, los MUE encuentran aplicaciones en disciplinas tan diversas como geología, biología y arquitectura. Su versatilidad los convierte en una herramienta invaluable para la investigación en una amplia variedad de campos [20].

1.2.3 Tipos de máquinas universales de ensayo

Las Máquinas Universales de Ensayos (MUE) se presentan en una variedad de modelos, cada uno diseñado para satisfacer necesidades específicas de prueba y aplicaciones particulares en la ingeniería mecánica y otros campos relacionados. Estos modelos se caracterizan por sus

capacidades de carga, tipo de actuación, sistema de control y aplicaciones especializadas [21]. La Tabla 4. muestra las diferentes categorías de modelos de MUE y sus características asociadas.

Tabla 4. Tipos de máquinas de ensayo

Tipos de MUE	Descripción
Electromecánicas	<p>Utilizan motores eléctricos para aplicar fuerzas de tracción, compresión y flexión.</p> <p>Son conocidas por su precisión y versatilidad en una amplia gama de ensayos.</p>
Dinámicas	<p>Se adaptan a aplicaciones de investigación y desarrollo.</p> <p>Son fundamentales a la hora de estudiar la fatiga y la durabilidad de materiales y componentes.</p> <p>Se utilizan en la evaluación de materiales bajo condiciones de carga repetitivas, como en las industrias aeroespaciales y automotrices.</p>
Hidráulica	<p>Generalmente se operan manualmente, con un dinamómetro que indica la fuerza que se está probando.</p> <p>Con su accionamiento por tornillo sin fin o cadena, permite realizar ensayos de materiales metálicos en tensión, compresión, flexión o corte.</p>

1.2.4 Máquina de ensayo electromecánico universal

Estas máquinas son más avanzadas debido a la tecnología utilizada para lograr todas sus funciones. El modelo comercializado por TestResources, Inc. incluye accesorios de alta calidad y electrónica integrada digital para el manejo de datos, como se muestra en la Figura 2.; se compone de vigas móviles y fijas. El accionamiento se realiza a través de un tornillo de bolas precargado.



Figura 2. Máquina de ensayo electromecánica

1.2.4.1 Ventajas de MUE Electromecánica.

MUE Electromecánicas: Las MUE electromecánicas emplean motores eléctricos como fuente de energía principal para aplicar fuerzas de compresión, tracción y flexión a las muestras. En la Tabla 5., se describen sus características distintivas:

Tabla 5. Ventajas de MUE electromecánica

Ventajas (MUE)	Descripción
Precisión y Control	Su alta precisión y control en la aplicación de cargas. Los motores eléctricos permiten ajustar con gran precisión la velocidad y la fuerza.
Versatilidad	Pueden adaptarse a una amplia gama de aplicaciones. Pruebas de materiales en laboratorios de investigación hasta pruebas de control de calidad en la industria
Mantenimiento	Las máquinas electromecánicas suelen requerir menos mantenimiento debido a la simplicidad de su diseño.
Tamaño Compacto	Suelen tener un tamaño más compacto en comparación con las MUE hidráulicas de alta capacidad [22].

Las MUE electromecánicas son ideales para aplicaciones de menor capacidad y alta precisión.

1.2.5 Tipos de comportamientos del material

Dentro del ámbito de las Máquinas Universales de Ensayos (MUE), una distinción fundamental se encuentra entre las MUE estáticas y las MUE dinámicas. Estos dos tipos de MUE se utilizan para evaluar el comportamiento mecánico de materiales y componentes en condiciones distintas y desempeñan papeles específicos en la ingeniería mecánica y en diversas aplicaciones industriales. A continuación, se presenta una comparación exhaustiva de estas dos categorías de MUE.

Las MUE estáticas se emplean principalmente para realizar ensayos en los que las cargas aplicadas son constantes y no cambian con el tiempo. A continuación, se exponen sus características clave:

1. **Evaluación de Comportamiento Bajo Cargas Constantes:** Las MUE estáticas se utilizan para comprender cómo los materiales y componentes responden a cargas constantes, como tensiones de tracción o compresión sostenidas.
2. **Medición de Propiedades Mecánicas Fundamentales:** Estas máquinas son esenciales para determinar propiedades mecánicas clave, como resistencia a la tracción, compresión, rigidez y deformación permanente.
3. **Simplicidad en los Ensayos:** Los ensayos estáticos son relativamente simples de realizar, y las MUE estáticas son ideales para pruebas de control de calidad y pruebas iniciales en la investigación de materiales.
4. **Amplia Gama de Aplicaciones:** Aunque se utilizan principalmente para ensayos estáticos, algunas MUE estáticas avanzadas pueden realizar pruebas de cizalladura y flexión [22].

Las MUE dinámicas se utilizan para ensayos en los que las cargas aplicadas varían con el tiempo, imitando condiciones dinámicas del mundo real. Las características sobresalientes son:

1. **Evaluación del Comportamiento bajo Cargas Variables:** Las MUE dinámicas permiten

simular condiciones de carga variables, como vibraciones, impactos y ciclos de carga repetitivos. Esto es esencial en la investigación de fatiga y durabilidad.

2. Pruebas de Ciclo de Vida: Son fundamentales para evaluar cómo los materiales y componentes resisten la fatiga y el desgaste a lo largo del tiempo, lo que es crucial en aplicaciones aeroespaciales, automotrices y de maquinaria.
3. Control Preciso de Velocidad y Frecuencia: Estas máquinas pueden controlar precisamente la velocidad y la frecuencia de carga, lo que permite realizar pruebas a varios niveles de estrés dinámico.
4. Investigación en Vibraciones y Acústica: Las MUE dinámicas son valiosas en la investigación de vibraciones y acústica, donde se requiere una comprensión profunda de la respuesta dinámica de materiales y estructuras [23].

Selección de MUE: La elección entre MUE estáticas y MUE dinámicas depende de los objetivos del ensayo y las condiciones de carga que se deseen simular. Las MUE estáticas son ideales para pruebas de resistencia y rigidez bajo cargas constantes, mientras que las MUE dinámicas son esenciales cuando se necesita simular condiciones dinámicas y ciclos de carga repetitivos. En última instancia, ambas categorías de MUE desempeñan un papel crítico en la evaluación de propiedades mecánicas y el desarrollo de materiales y componentes resistentes y duraderos en una variedad de industrias y aplicaciones.

1.2.6 Proceso de ruptura

El proceso de ruptura en una máquina de ensayo es un procedimiento crucial para evaluar el comportamiento mecánico de materiales y componentes. Este proceso proporciona información valiosa sobre la resistencia, la durabilidad y las propiedades mecánicas de los materiales, y es una parte fundamental de la ingeniería mecánica y de materiales [14]. En la Figura 3., se presenta una descripción detallada del proceso de ruptura en una máquina de ensayo.

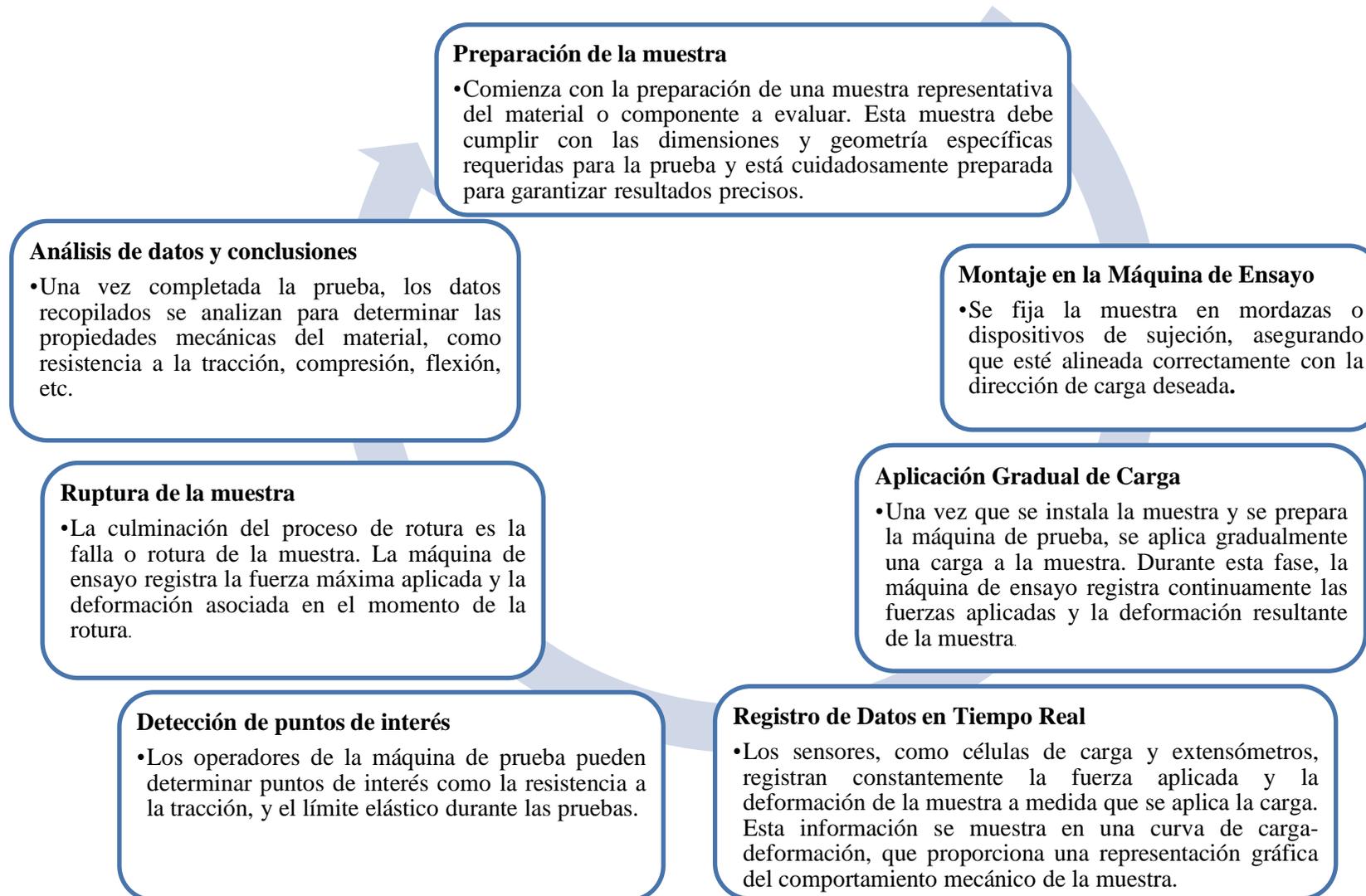


Figura 3. Flujograma del proceso de ruptura

En resumen, el proceso de ruptura en una máquina de ensayo es un proceso esencial para evaluar las propiedades mecánicas de materiales y componentes. Proporciona información vital para garantizar la seguridad y el rendimiento de productos y estructuras en una amplia gama de aplicaciones industriales y científicas. La ejecución y el análisis adecuados de este proceso son cruciales para el progreso continuo en la ingeniería mecánica y de materiales.

1.3 Aspecto metrológico

El término "metrología" proviene del Sistema Internacional de Unidades (SI), donde "metro" es la unidad base de longitud [24]. Por lo tanto, la metrología es un componente importante en la ingeniería mecánica y en una variedad de disciplinas técnicas y científicas. donde implica la aplicación de métodos y procedimientos diseñados para garantizar la precisión, exactitud y trazabilidad de las mediciones, lo que es esencial para tomar decisiones informadas sobre el diseño, fabricación y control de calidad de productos y sistemas mecánicos.

1.3.1 Aseguramiento metrológico

El aseguramiento metrológico es un conjunto de actividades planificadas y sistemáticas que tienen como objetivo garantizar que las mediciones realizadas sean confiables y precisas. Esto implica asegurar que los instrumentos de medición estén calibrados adecuadamente, los procedimientos de medición sean consistentes y las mediciones sean trazables a estándares de referencias nacionales o internacionales.

Los componentes clave del aseguramiento metrológico son:

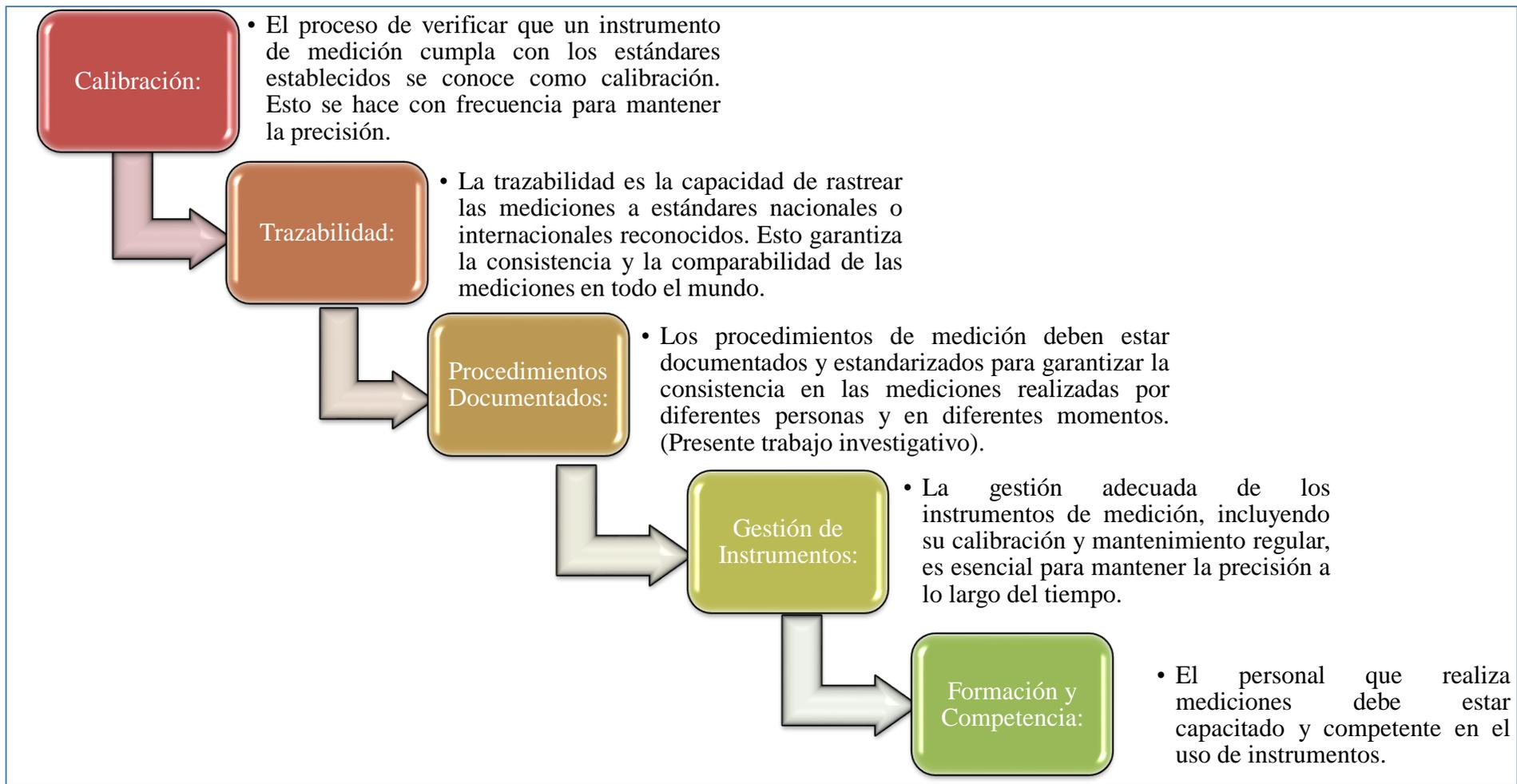


Figura 4. Componentes claves del aseguramiento metrológico [25]

1.3.2 *Parámetros de aseguramiento que intervienen en el ensayo de tensión*

La práctica dentro del laboratorio consiste en examinar los resultados de los diferentes ensayos verificando las diferencias observadas entre dos o más ensayos, para ello es necesario mantener un sistema que permita evaluar el desempeño del método utilizado para dichas pruebas. Se ha planificado realizar un análisis de varianzas (ANOVA) para garantizar la calidad de los resultados, en el formato Excel con código LRM-FP-02 adjunta en el Anexo 10, es decir, un examen de hipótesis para confirmar que los resultados de dos o más muestras son idénticos. La importancia de uno o más factores se evaluará comparando las medias de las variables de respuesta en diferentes niveles.

Hipótesis nula: Afirma que todas las medias de la población (medias de los niveles de factores) son iguales [26].

Hipótesis alternativa: Al menos una media es diferente [26].

Test F: El examen se realiza en una tabla ANOVA para determinar si cumple o no con la hipótesis planteada, la cual implica que el F calculado sea menor que el F crítico, tal como se muestra en la Ecuación 1.

(1)

SI $f_{cal} < F$ crítico = No se rechaza la hipótesis

SI $f_{cal} \geq F$ crítico = Se rechaza la hipótesis

La Tabla 6. contiene los factores que deben calcularse para obtener los factores que conforman la ANOVA:

Tabla 6. Datos para ANOVA [27]

Fuente de variación	Suma de cuadrados (SS)	v	Cuadrado medio (MS)	F	P	F crit
Entre grupos	SS_e	$p - 1$	$MS_e = SS_e / (p - 1)$	MS_e / MS_i	$< 0,05$	$> F$
Intra grupo (residuales)	SS_i	$N - p$	$MS_d = SS_d / (N - P)$			
Total	$SS_{tot} = SS_e + SS_i$	$N - 1$				

Para obtener los valores de ANOVA se aplicará las fórmulas que se indican en la tabla anterior en la cual se especificaran de manera individual.

1. Entre grupos:

1.2. Suma de cuadrados (SSE):

$$SS_e = \frac{1}{n} * \text{suma. cuadrados}(\text{totales}_{y_i}) - \left(\frac{\text{suma total}_{y_i}^2}{N} \right) \quad (2)$$

Donde:

- y_i : Suma de lecturas de cada técnico
- n : Número de lecturas
- N : Número de lecturas de todos los técnicos del ensayo

1.3. Grados de libertad:

$$v = n - 1 \quad (3)$$

1.4. Cuadrados medios:

(4)

$$Mse = \frac{SSe}{(n - 1)}$$

2. Intra grupo:

2.1. Suma de cuadrados (SSi):

(5)

$$SS_i = SS_{tot} - SS_e$$

2.2. Grados de libertad:

(6)

$$v = N - p$$

2.3. Cuadrados medios:

(7)

$$MS_d = \frac{SS_d}{(N - p)}$$

3. Totales

3.1. Suma de cuadrados:

(8)

$$SS_{tot} = \text{Suma. cuadrados}(\# \text{ lec. totales}) - \left(\frac{\text{Total}_{y^2}}{N}\right)$$

3.2. Grados de libertad:

(9)

$$v = N - 1$$

4. Para obtener el factor de f calculado se utiliza la siguiente fórmula:

(10)

$$f_{cal} = \frac{MS_e}{MS_d}$$

5. Para obtener el factor de F crítico se utiliza la siguiente fórmula de Excel:

(11)

$$F_{critico} = INV.F(probabilidad; p - 1; N - p)$$

6. Para determinar el valor de P se utiliza la siguiente fórmula en Excel:

(12)

$$P = DISTR.F(f_{cal}; n - 1; N - p)$$

Para determinar si la hipótesis se cumple o no se evalúan los resultados con el test F. De ser el caso de no cumplir se debe repetir el ensayo para determinar las posibles causas que pudieren a ver afectado al proceso de toma de datos durante los ensayos realizados. De ser el caso de que se cumpla la hipótesis se prosigue a determinar los valores de precisión intermedia siguiendo los siguientes pasos. Si antes mencionar que, en los procesos dentro de ensayos de laboratorio es necesario controlar la desviación estándar de precisión intermedia, con uno, dos o tres factores diferentes, que se obtienen a partir de ensayos en un laboratorio y magnitud específica, con la expectativa de precisión en cada ensayo se mantienen al nivel deseado. Solo con este factor de precisión es suficiente en la mayoría de los casos, incluso si los resultados tienen mucho sesgo (error) puesto que nos permite monitorear y controlar la variación del proceso.

1. Determinar el valor de precisión intermedia entre los grupos de probetas, esta puede calcularse combinando los componentes de las varianzas intra-grupos y entre-grupos aplicando la siguiente Ecuación 13:

(13)

$$S_I = \sqrt{Sr^2 + Si^2}$$

En donde:

Sr: Desviación estándar de la repetibilidad, este valor se obtiene calculando la raíz cuadrada del término del cuadrado medio dentro del grupo, que representa la varianza intra-grupo [28]:

(14)

$$Sr = \sqrt{MS_d}$$

Si: La Tabla ANOVA proporciona la contribución a la variación total del factor de agrupamiento [28].

(15)

$$Si = \sqrt{\frac{MSe - MSi}{n}}$$

Límite de precisión intermedia: Para una distribución normal con nivel de probabilidad del 95 % se utiliza un valor aproximado de 2,8 el cual será multiplicado por el valor de precisión intermedia entre los técnicos de ensayo [2].

(16)

$$\text{Límite precisión intermedia} = S_I * 2,8$$

NOTA: Cuando se obtiene varios límites de un intervalo o rango de medidas, se tomará el valor de precisión más alto (suponiendo que es la máxima diferencia entre las muestras).

1.3.3 *Exactitud del proceso*

Para asegurar la compatibilidad de los resultados y evidenciar diferencias significativas entre los ensayos de tracción y los técnicos o las posibles causas que pudieran haber afectado este proceso, se determina la concordancia entre resultados mediante la prueba de TUKEY.

1.3.3.1 **Prueba de Tukey.**

La prueba de Tukey es un método que tiene como fin comparar las medias individuales provenientes de un análisis de varianza de varias muestras sometidas a tratamientos distintos [29].

Para comparar, este análisis calcula las lecturas promedio de los ensayos de tracción de cada técnico.

(17)

$$Prom = \frac{\sum_{i=1}^n n_i}{n}$$

Se debe obtener las diferencias de los promedios de lectura entre los técnicos que realizan el ensayo.

(18)

$$Diferencia = Tecnico_n - Técnico_{n-1}$$

Con los valores de las diferencias entre técnicos se aplica el Factor de Tukey mediante la Ecuación 19.

(19)

$$w = q * \sqrt{\frac{CME = MS_d}{r = n}}$$

Donde:

q = Como se muestra en la Tabla 7., el factor se puede calcular ingresando el número de participantes y los grados de libertad de las lecturas tomadas.

Tabla 7. Factor de Tukey [2]

Número de grupos	Número de muestras	Grados de libertad	Factor de tukey
3	36	33	3,47

Las diferencias entre cada uno de los grupos de ensayo, (1 vs 2); (1 vs 3); (2 vs 3), debe ser menor igual a W para aceptar la hipótesis que no existe diferencias significativas.

$$Diferencias\ entre\ grupos < W$$

De no cumplir se concluye que existen diferencias significativas entre los resultados obtenidos.

1.3.3.2 Determinación de límites.

Para obtener los valores de control, también llamados límites de acción y límite de advertencia, para controlar el proceso para futuros ensayos de tracción.

1. Se determina la estimación de las desviaciones estándar de precisión intermedia por (tiempo + operador) diferentes.

(20)

$$w = |x_1 - x_2|$$

(21)

$$S_I(TO) = \left(\frac{\sum_{i=1}^n \frac{w_i}{n}}{2} \right) = \bar{w}/d_2$$

2. Línea central

(22)

$$lc = d_2 \sigma_{I(TO)}$$

Donde:

d_2 : Coeficiente para la línea central. Valor para un número de observaciones en el subgrupo. Estos valores se verán reflejados en la Tabla 8.

σ_I = límite de precisión intermedia

3. Límite de acción:

(23)

$$LCS = D_2 \sigma_{I(TO)}$$

Donde:

D_2 : Coeficiente para los límites de acción. Valor para un número de observaciones en el subgrupo. Estos valores se verán reflejados en la Tabla 8.

Tabla 8. Coeficientes para calcular la línea central y los límites de acción [2]

Número de observaciones en el subgrupo	Coeficiente para la línea central d2	Coeficiente para los límites de acción D2
2	1,128	3,686

4. Límite de advertencia:

(24)

$$LCS = D_{2(2)}\sigma_{I(TO)}$$

Donde:

$D_{2(2)}$: Coeficiente para los límites de advertencia. Valor para un número de observaciones en el subgrupo. Estos valores se verán reflejados en la Tabla 9.

Tabla 9. Coeficientes para calcular los límites de advertencia [2]

Número de observaciones en el subgrupo	d2	D1(2)	D2(2)
2	0,853	1,128	3,686

Se llevó a cabo una evaluación de todos los datos obtenidos en el laboratorio de ensayos de la Universidad Politécnica Salesiana para garantizar las mediciones realizadas con la máquina de ensayo, asegurando que el sistema de medición cumple con los parámetros establecidos y que no hay variaciones en el método utilizado, lo que garantiza la validez de los resultados. Toda esta sistemática determinará los resultados de los ensayos los cuales serán empleados en el

formato LRM-FP-04 adjunta en el Anexo 10 y se declarará en la hoja de datos de gráfico de control. Para finalizar, se va a analizar e interpretar los diferentes resultados utilizando la NORMA NTE INEN-ISO 5725-6 [2], con estos resultados se determinará cuáles son los parámetros óptimos en la exactitud del proceso de ensayo de tensión.

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El desarrollo de esta investigación se basa en el aseguramiento metrológico compuesto por la calibración de la máquina de ensayo universal Testresources y el análisis de tracción para acero de baja aleación AISI 4340 siguiendo la NORMA NTE INEN-ISO 5725-6 [2], detallando las fórmulas aplicadas y el proceso para asegurar los futuros ensayos, las cuales servirán como un fundamento para el avance metrológico y su aseguramiento de las mediciones en los ensayos de tracción.

2.1 Desarrollo del aseguramiento metrológico

Se implementará un sistema de aseguramiento metrológico basado en los cuales se debe asegurar los parámetros de veracidad y precisión para asociarlos con los resultados del método de ensayo que se va a utilizar para realizar el ensayo de tracción. Con la implementación mediante un ensayo experimental para el acero de baja aleación AISI 4340 se podrá implantar un control metrológico para un ensayo de rutina.

2.1.1 Trazabilidad

La trazabilidad ayuda a mantener la integridad de los procesos de medición al proporcionar una documentación detallada de cómo se lleva a cabo la calibración y como se relacionan las mediciones con estándares conocidos, manteniendo una cadena de trazabilidad como se indica en la Figura 5., con formato LRM-FP-05 adjunta en el Anexo 10. En metrología es muy común utilizar el término “carta de trazabilidad” al flujograma que indica la información relevante sobre los patrones utilizados y laboratorios que ejecutan la calibración.

CARTA DE TRAZABILIDAD

Código:	LRM-FP-05
Revisión:	0
Vigencia:	2023-11-01

T r a z a b i l i d a d e x t e r n a

T r a z a b i l i d a d i n t e r n a

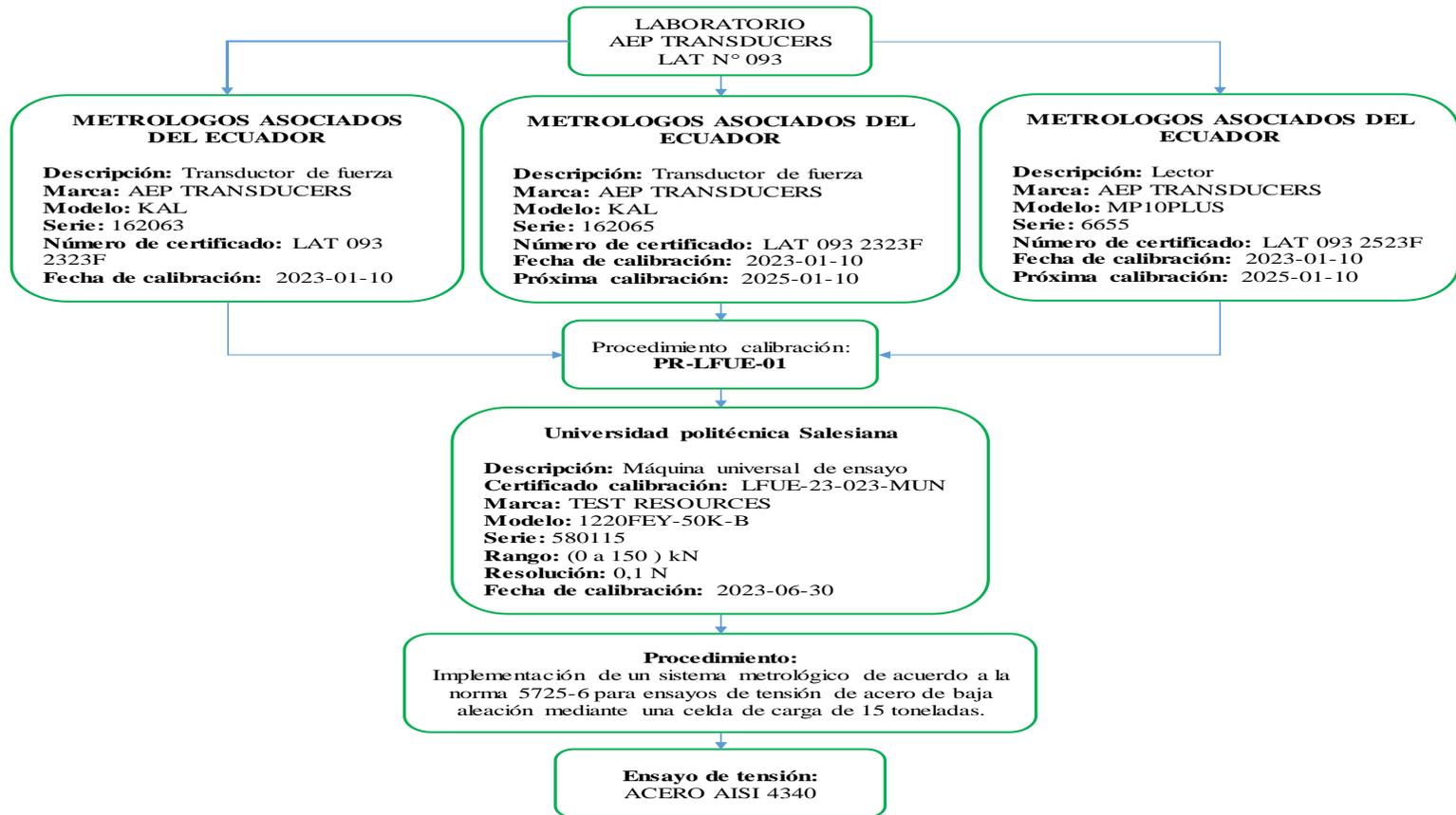


Figura 5. Carta de trazabilidad

2.1.2 Calibración

Para implantar un sistema metrológico es necesario tener todos los equipos de medición que intervienen en el proceso calibrados, recordando que la calibración es la acción que compara un equipo de menor exactitud con un equipo denominado patrón de mayor exactitud, con lo cual se obtiene un error de medida y una incertidumbre asociada a sus resultados.

2.1.2.1 Calibración de máquina de ensayo universal Testresources.

Se realiza la calibración de la MUE Testresources por un laboratorio de calibración externo con transductores de fuerza Figura 6., trazables a laboratorio internacionales (AEP TRANSDUCERS), mediante el método de comparación directa.

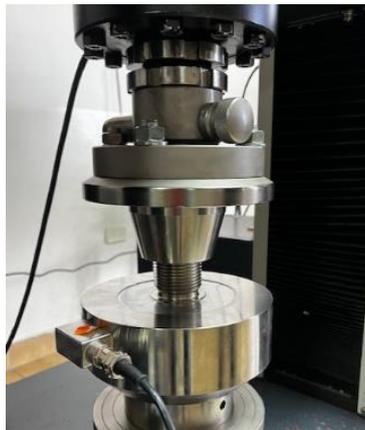


Figura 6. Transductor de fuerza patrón

2.1.2.2 Proceso de calibración.

Para calibraciones de máquinas de ensayo universal, estas tienen el modo de tracción y compresión por lo tanto tienen dos áreas de trabajo con un dispositivo indicador Figura 7., y aplicador de fuerza en común Figura 8., podría realizarse una calibración, ya que, por ejemplo, la compresión en el área de trabajo superior iguala a la tracción en el área de trabajo inferior, y viceversa [30].

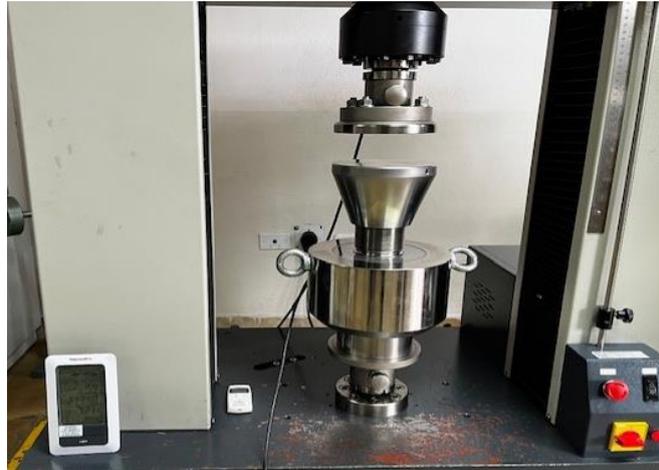


Figura 7. Calibración de MUE con transductor patrón



Figura 8. Resultado de calibración de la MUE

2.1.2.3 Resultados de calibración de la MUE.

Como resultado de la calibración se obtiene un certificado en el cual se detalla las normas y procedimientos utilizados, así también como los puntos verificados y acompañados de su error e incertidumbre. Con estos datos es posible verificar si estos errores obtenidos están dentro de los errores máximos permitidos según la norma aplicable o su fabricante, como muestra en Tabla 10. y 11.

Tabla 10. Resultados certificado calibración LFUE-23-023-MUN. Sistema internacional

Valor nominal (kN)	Error (kN)	Incertidumbre de medición (kN) U (k=2)
15	-0,02	0,40
30	-0,07	0,22
45	-0,03	0,16
60	-0,25	0,27
75	-0,31	0,10
90	-0,32	0,15
105	-0,52	0,40
120	-0,83	0,19
135	-0,78	0,27
150	-0,93	0,12

Tabla 11. Resultados de calibración LFUE-23-023-MUN sistema inglés

Valor nominal (tnf)	Error (tnf)	Incertidumbre de medición (tnf) U (k=2)
2	-0,002	0,041
3	-0,007	0,022
5	-0,003	0,016
6	-0,025	0,028
8	-0,032	0,010
9	-0,033	0,015
11	-0,053	0,041
12	-0,085	0,019
14	-0,080	0,028
15	-0,095	0,012

2.1.2.4 Evaluación de resultados.

Es necesario realizar la evaluación de los resultados de calibración como se muestra en la Tabla 12., en base a los errores máximos permitidos (EMP) o las especificaciones de los fabricantes con el fin de corroborar que la máquina se encuentra en buen estado y mantiene sus características iniciales, con lo que se asegura que los resultados emitidos durante los ensayos son metrológicamente válidos.

Tabla 12. Conformidad de resultados de calibración

Valor nominal (kN)	Error (kN)	Especificación 1% lectura (kN)	Estatus
15	-0,02	0,15	Cumple
30	-0,07	0,30	Cumple
45	-0,03	0,45	Cumple
60	-0,25	0,60	Cumple
75	-0,31	0,75	Cumple
90	-0,32	0,90	Cumple
105	-0,52	1,05	Cumple
120	-0,83	1,20	Cumple
135	-0,78	1,35	Cumple
150	-0,93	1,50	Cumple

En la Figura 9., se mostrará visualmente los límites que corresponden a los EMP y el comportamiento de los errores en el intervalo de calibración.

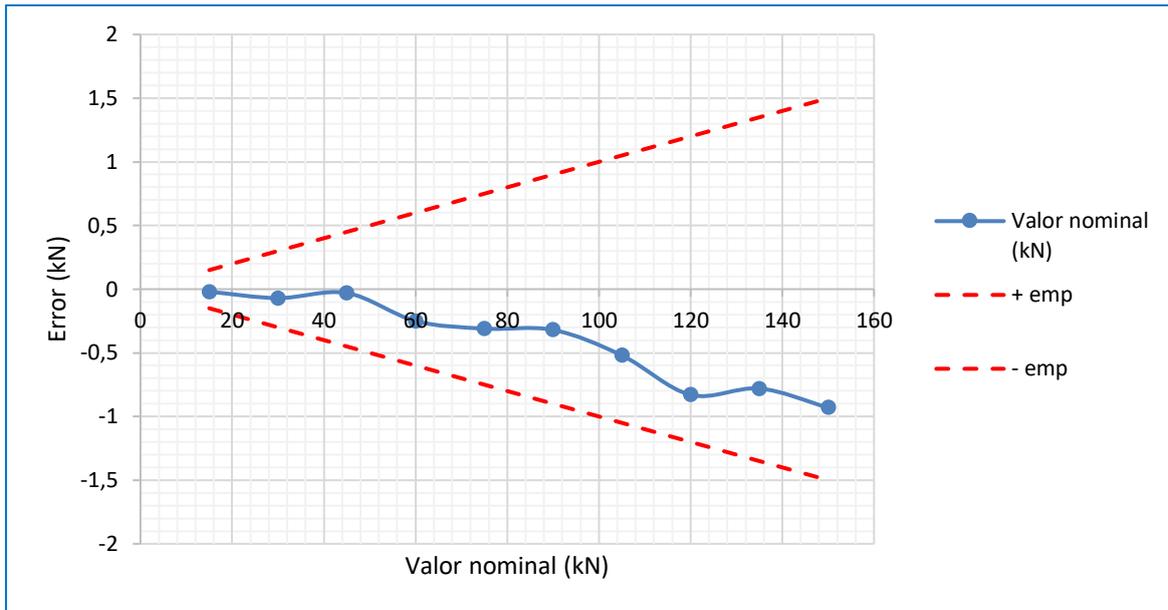


Figura 9. Gráfico de resultados de calibración

Como se puede observar los errores están dentro de la especificación que corresponde a la clase de exactitud de la máquina, por lo que se concluye el buen estado metrológico y los resultados son confiables para realizar los ensayos de tensión. En la Figura 10., se sintetizará el proceso de calibración de MUE, utilizada para ensayos

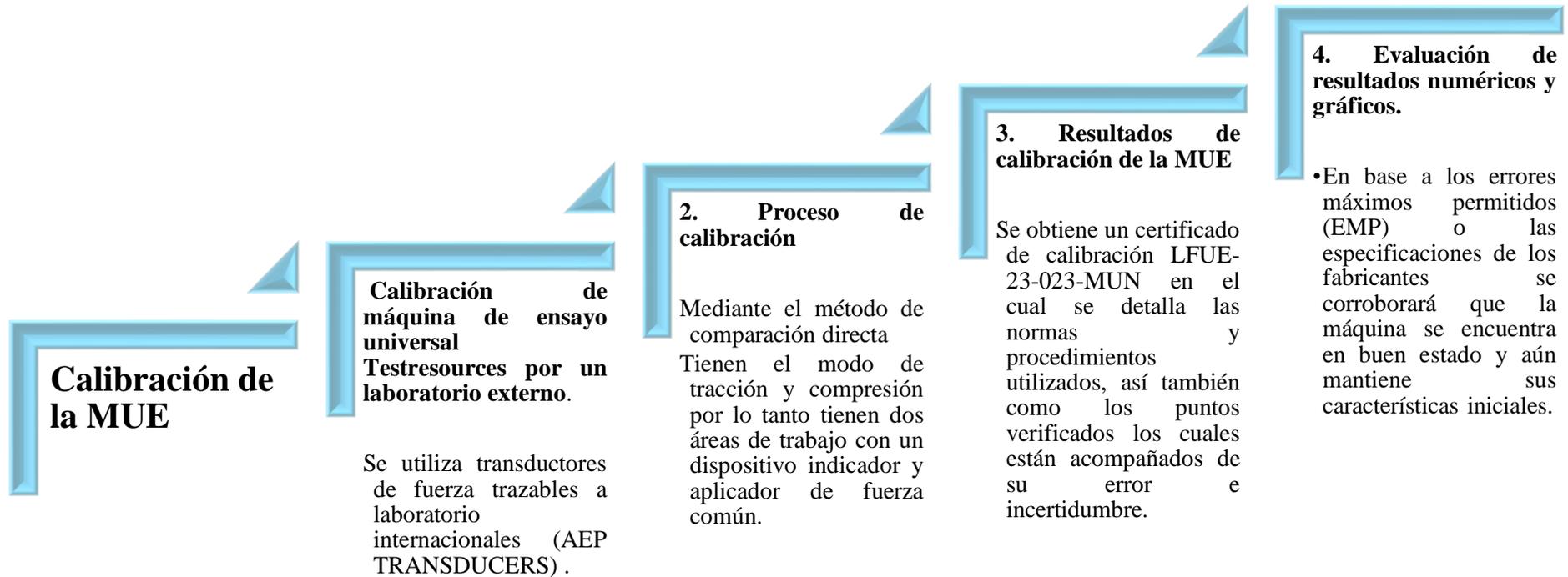


Figura 10. Flujograma del proceso de calibración de la máquina TESTRESOURCES

2.1.3 Ensayo de tensión

Se implementó un protocolo detallado para estos ensayos, adaptándose a las especificaciones del material. El ensayo se llevó a cabo utilizando una máquina universal de ensayos, que permite aplicar una carga axial de manera controlada a la probeta hasta su ruptura. La máquina proporciona datos importantes como el límite elástico, la resistencia máxima a la tracción y el porcentaje de elongación para registrar la relación entre la carga aplicada y la deformación del material.

2.1.4 Máquina de ensayos universal MUE

La máquina de ensayo “Test Resources Universal Testing Machine” es la encargada de realizar los ensayos de tracción, es una máquina de ensayo que cuenta con una celda de carga calibrada hasta 15 toneladas la cual puede llevar a cabo ensayos de tracción, compresión y flexión, entre otros. Esta máquina nos permite realizar ensayos de tracción a probetas de acero AISI 4340 sin problemas. Para interactuar con esta máquina el fabricante incluye el software desarrollado por la marca en el que se configuran varios parámetros según el tipo de ensayo que se necesite realizar, tipo de geometría de las probetas, avance de las mordazas, resultados, entre otros; la Tabla 13. indica las características de fabricación y la Tabla 14. presenta a breves rasgos los puntos que se configuran dentro del software especializado en el caso puntual de la presente investigación.

Tabla 13. Ficha técnica máquina universal de ensayos Test Resources

Denominación	Características
Capacidad	± 150 kN (15,29 t)
Longitud de carrera	1 220 mm (49 in)
Espacio de prueba vertical	1 400 mm (55 in)
Espacio de prueba horizontal	550 mm (22 in)
Velocidad máxima	300,0 mm/min (12,0 in/min)
Velocidad mínima	0,25 mm/min (0,01 in/min)
Velocidad máxima de retorno	300 mm/m (12 ipm)

Dimensiones del espacio	2134 × 1168 × 584 mm (84 × 46 × 23 in)
Peso	771 kg (1700 lbs)
Requisitos de alimentación	208-230V 5.6A 50/60Hz

Tabla 14. Puntos de configuración de software

Parámetros	Valores
Análisis a efectuar	Carga
Celda de carga	15 toneladas
Geometría de la probeta	Circle
Avance	10 mm / min
Número de probetas	36 unidades

2.1.5 *Probetas de acero AISI 4340*

Para realiza ensayos de tracción, es necesario contar con probetas que cumplan estándares adecuados en donde se pueda observar la resistencia del material.

La probeta circular para una prueba de tracción típica y las dimensiones específicas del ensayo se muestran en la Figura 11. con el diámetro original d_o y la longitud calibrada l_o , que se usa para medir las deformaciones.

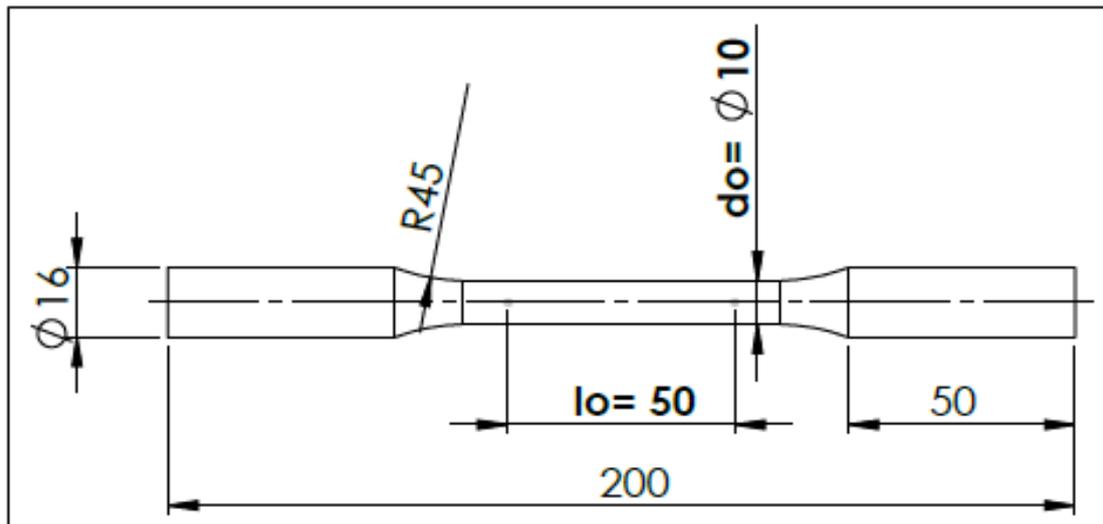


Figura 11. Dimensiones de la probeta circular

2.1.5.1 Acero AISI/SAE 4340.

Las principales propiedades del acero AISI 4340 son:

- Acero bonificado al cromo, níquel y molibdeno tiene una alta resistencia mecánica y una excelente resistencia a la fatiga y la torsión;
- Su aleación de molibdeno lo protege de la fragilidad de revenido y;
- Alta flexibilidad [31].

Este acero es utilizado para la fabricación de elementos de maquinaria de grandes secciones altamente exigidos, como son: ejes, piñones, pernos grado 6, rotores, levas, bridas de alta presión, piezas de maquinaria pesada [31]. Sus propiedades se pueden ver reflejadas en las tablas 15. y 16.

Tabla 15. Propiedades mecánicas del acero AISI/SAE 4340 [32]

Propiedades	Características
Resistencia a la tracción	(90 a 100) kg/mm ²
Esfuerzo de cadencia	70 kg/mm ²
Elongación	min 12%

Reducción de área Z	min 45%
Resistencia al impacto KU	aprox. 20 J
Dureza	(270 a 330) HB [32]

Tabla 16. Propiedades físicas acero AISI/SAE 4340 [32]

Propiedades	Características
Densidad	7,85 g/cm ³ (0,284 lb/in ³)

2.1.5.2 Fabricación de probeta.

Se realiza el devastado de del material en bruto conforme a las dimensiones de la Figura 11., con un torno como se aprecia Figura 12.



Figura 12. Maquinado de probeta

2.1.6 Configuración de software

Para realizar el ensayo de tracción se configura el software en modo tracción con la celda de carga calibrada hasta 15 toneladas, una vez ya realizada la configuración del tipo de ensayo que se va a realizar, se selecciona el tipo de geometría de las probetas a ensayar, para el caso específico del ensayo determinar el límite de precisión intermedia; su geometría es circular por lo que en el apartado “Specimen” del software se selecciona “Round”, esto se incluye en el casillero correspondiente dentro de la configuración de tracción como se presentan en la Figura 13.

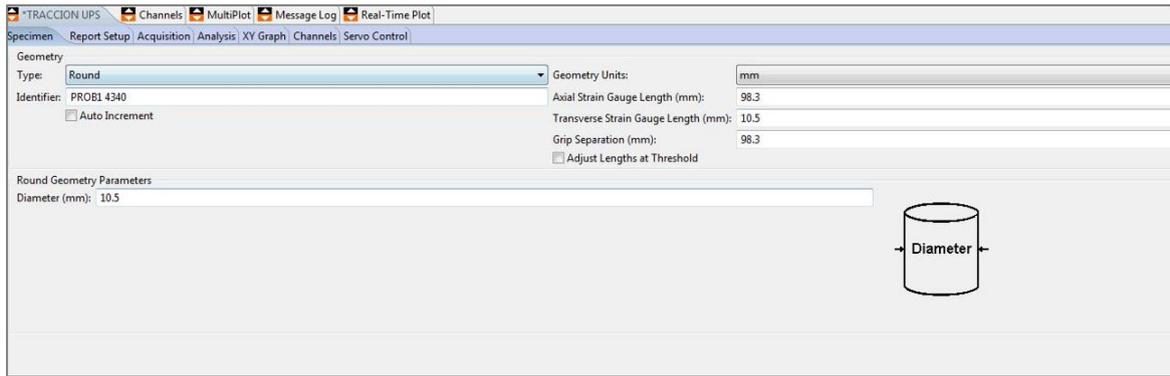


Figura 13. Ajustes de probetas dentro software especializado

En la Figura 14. se muestra los resultados mediante la gráfica resultante que se obtiene con el ensayo de tracción los cuales son configurados en el apartado “Graph”, seleccionado los tipos de datos en los ejes “x” y “y” respectivos al valor de carga (Load) en Newton (N) y desplazamiento (Position) en milímetros (mm), para maximizar la calidad de la gráfica se activa la opción de auto escala la cual se encuentra en el apartado “Sample Graph”.

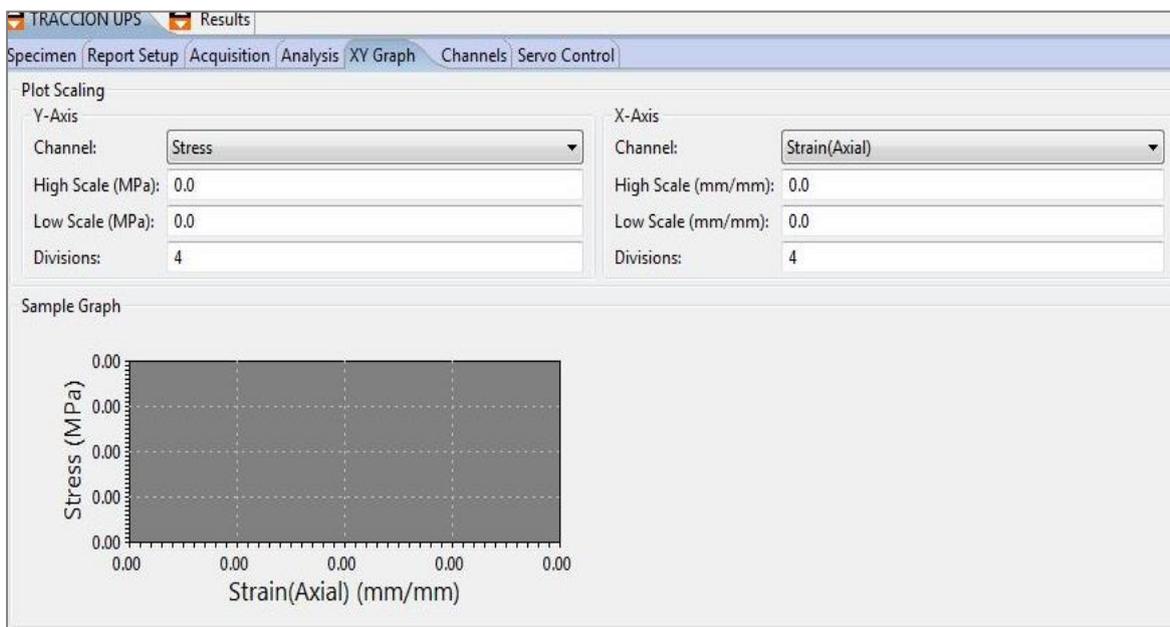


Figura 14. Configuración del software para la carga en comparación con la posición

La Figura 15. muestra el apartado “Servo Control” en donde se configura el avance del módulo de carga y la velocidad de toma de datos, para el avance el manual de la maquinaria [20], indica una velocidad de 5 mm/min, sin embargo, las pruebas realizadas concluyeron con graficas de carga vs posición demasiado variables por lo que se tomó la decisión de usar un avance de 10 mm/min. La velocidad para la toma de datos se configura a una tasa de 20 datos obtenidos por cada segundo, de nuevo haciendo caso omiso del manual y basándose en pruebas concretadas.

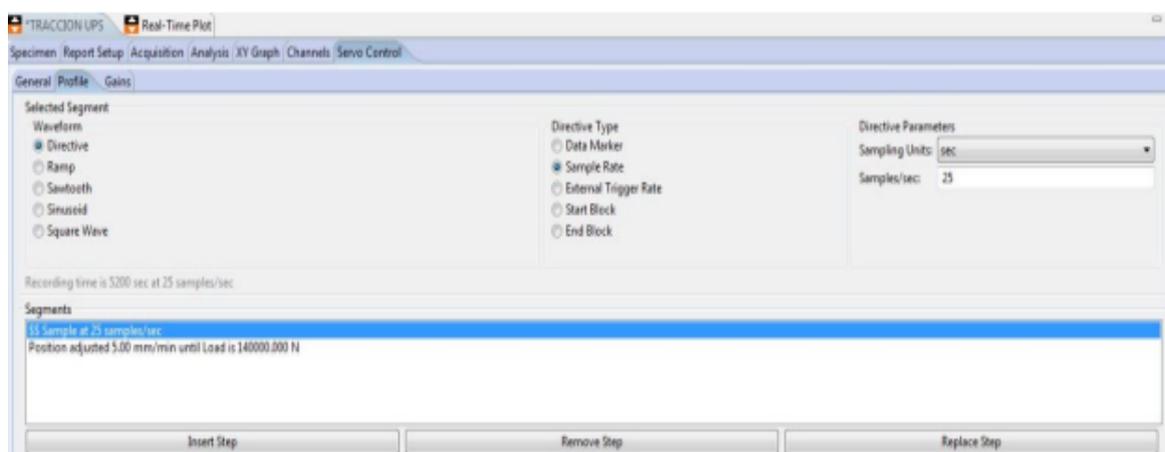


Figura 15. Configuración del avance y toma de datos dentro del software especializado

Previo a comenzar con el ensayo de tracción a una probeta, es necesario establecer las medidas que la máquina necesita. La Figura 16. detalla los valores a mensurar en las probetas y en las mordazas de sujeción, los cuales son: el diámetro (d_0) Figura 2.7., el largo (l_0) Figura 11. y la distancia de separación entre mordazas (N) Figura 17. Estas dimensiones son necesarias para el cálculo de área transversal de la probeta y la deformación que esta presenta al transcurrir el ensayo de tracción. Estas medidas deben ser registradas en el formato protocolo LRM-FP-01 adjunto en el Anexo 10.

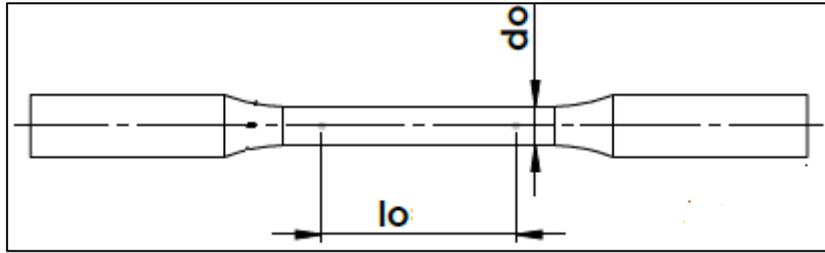


Figura 16. Probeta

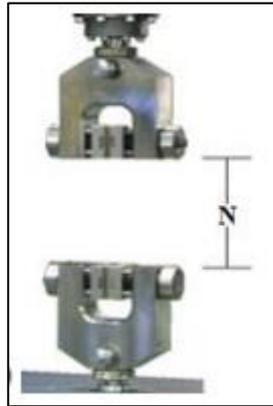


Figura 17. Distancia de la probeta en la máquina para ensayos a tracción

Al comenzar a realizar el ensayo de tracción desde el software, este indica que la carga sea administrada se forma progresiva para obtener valores de carga aplicada sobre la probeta comparándola con la posición de la parte superior de la probeta al transcurrir el tiempo.

2.1.7 Resultados gráficos del ensayo de tracción

La grafica que nos denota como resultado esta mostrada en la Figura 18. y esta va a variar por cada ensayo realizado debido a varios factores en su montaje y construcción, pero siempre obtendremos los valores de carga que se aplicó en cada ensayo y el desplazamiento de la celda de carga superior.

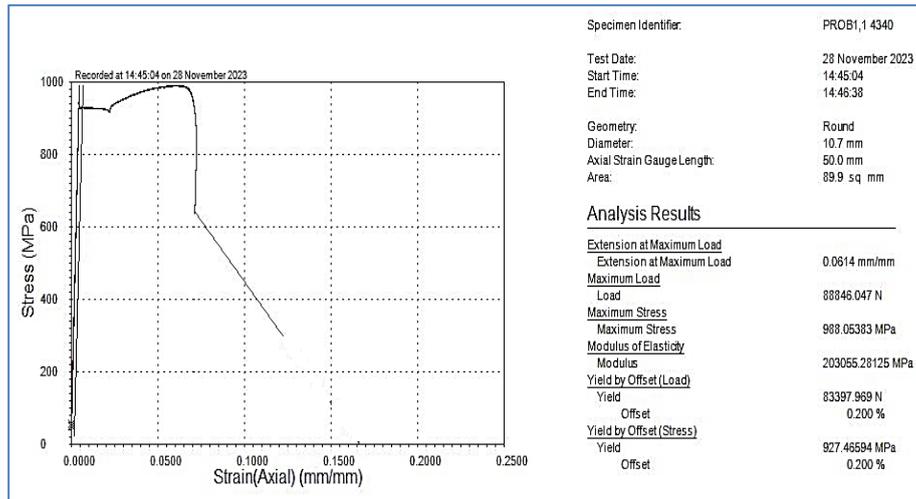


Figura 18. Gráfica carga vs posición

Los resultados que se obtienen al realizar el ensayo de tensión a un material de baja aleación como es el AISI 4340 son: carga máxima, esfuerzo máximo, módulo de elasticidad y deformación axial. Cabe recalcar que el software asociado a la máquina es el que nos indica el resultado cuando sufre la ruptura el material, y estos resultados son los que se van a evaluar estadísticamente para determinar los límites de control, los cuales van ayudar a mantener un control para futuras pruebas de este material en conjunto con la máquina de ensayos universales. Estos resultados deben ser registrados en el protocolo LRM-FP-01 adjunto en el Anexo 10.

2.1.8 *Los resultados numéricos del análisis de tracción*

Las tablas de resultados 17., 18. y 19. muestran los resultados de los ensayos de tracción, que difieren debido a varios factores externos, como la posición de la probeta, el ajuste de la máquina, lugar de la ruptura, así también como el diámetro de la probeta y la distancia a la cual se coloca la probeta antes de realizar el ensayo, con lo que se asegura que los resultados obtenidos cubran todas las posibles variaciones que se puedan suscitar durante el control posterior, asegurando un método robusto de verificación.

Las tablas de resultados están divididas en tres grupos cada uno con doce probetas, en donde se muestra la carga máxima, el esfuerzo máximo, el módulo de elasticidad y la deformación axial. Todos estos resultados son propiedades del material, los cuales están clasificados por parámetros individuales en donde se obtiene un estadístico y además se puede sintetizar la información para limitar la precisión de cada uno de ellos.

Tabla 17. Resultados ensayo de tracción grupo 1

N° Probeta	Diámetro (mm)	Distancia entre mordazas (mm)	Carga máxima (N)	Esfuerzo máximo (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)	Deformación axial (mm/mm)
1	10,7	91,3	78846,047	988,054	207505,938	0,0614
2	10,6	94,5	78975,031	1006,346	204520,844	0,0582
3	10,7	98,5	79973,336	1000,590	203986,813	0,0503
4	10,7	98,6	88846,047	988,054	204711,656	0,0512
5	10,7	98,5	89240,727	996,164	193554,813	0,0539
6	10,6	98,5	86594,070	963,010	201521,219	0,0502
7	10,7	97,6	79985,180	959,943	193026,781	0,0598
8	10,2	92,3	78442,586	996,767	209700,688	0,0578
9	10,0	92,3	78148,516	1015,221	192911,813	0,0602
10	9,9	92,0	77949,891	992,489	189028,031	0,0535
11	10,1	93,5	79634,359	1013,936	201195,281	0,0572
12	10,2	93,2	79198,406	1008,385	216245,906	0,0509

Tabla 18. Resultados ensayo de tracción grupo 2

N° Probeta	Diámetro (mm)	Distancia entre mordazas (mm)	Carga máxima (N)	Esfuerzo máximo (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)	Deformación axial (mm/mm)
1	10,0	92,4	78272,336	996,594	207629,313	0,0598

2	10,0	93,3	78672,172	1001,685	197615,406	0,0558
3	10,0	90,2	80710,047	1027,632	198375,125	0,0542
4	10,0	90,5	78114,997	994,591	203055,281	0,0585
5	10,0	90,4	78231,063	996,069	203026,781	0,0592
6	10,0	92,0	80823,547	1029,077	206797,219	0,0539
7	10,0	90,6	78648,953	1001,389	204520,844	0,0502
8	10,0	91,5	79113,281	1007,301	193986,813	0,0598
9	10,0	91,3	78460,641	998,992	204711,656	0,0578
10	10,0	90,8	78904,328	1004,641	213554,813	0,0535
11	10,0	90,0	81504,555	1017,300	188375,126	0,0572
12	10,0	91,3	86405,760	1017,152	210727,372	0,0509

Tabla 19. Resultados ensayo de tracción grupo 3

N° Probeta	Diámetro (mm)	Distancia entre mordazas (mm)	Carga máxima (N)	Esfuerzo máximo (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)	Deformación axial (mm/mm)
1	10,0	90,6	82722,117	1016,333	203055,281	0,0514
2	10,1	90,2	80124,477	1020,176	191160,328	0,0532
3	10,2	90,5	78184,633	995,478	190238,891	0,0563
4	10,4	90,0	79330,789	984,606	207386,95	0,0612
5	10,0	90,6	79617,117	949,877	216487,438	0,0569
6	10,0	90,7	79539,734	987,266	200931,625	0,0602
7	10,0	90,0	79462,351	1024,656	208339,453	0,0598
8	10,0	90,0	79384,968	1062,046	215790,594	0,0558
9	10,0	92,1	78307,585	1099,436	200485,68	0,0542
10	10,1	91,9	79307,585	1099,436	201055,281	0,0585
11	10,2	92,0	80462,351	984,606	201095,281	0,0592
12	10,0	90,8	80384,968	949,877	206095,281	0,0539

Estos resultados se obtuvieron asimilando ensayos rutinarios, en donde cuenta con todas las posibles causas o factores que pudieren afectar, con lo que se pretende tener reproducibilidad en futuros ensayos y mantener un método confiable independientemente que técnico realice el ensayo. Toda esta información será analizada; la sistemática aplicar es la comparación de los resultados provenientes de los tres grupos, los cuales nos ayudarán a obtener el límite de precisión intermedia de cada una de las propiedades del acero AISI 4340. Este análisis nos permitirá monitorear futuros ensayos, ya que se podrá verificar si el material cumple o no cumple con las características previamente determinadas en este estudio, proporcionando un estatus de conformidad para el material y controlando la tendencia de los resultados de la máquina. En la Figura 19., se detalla el proceso realizado.

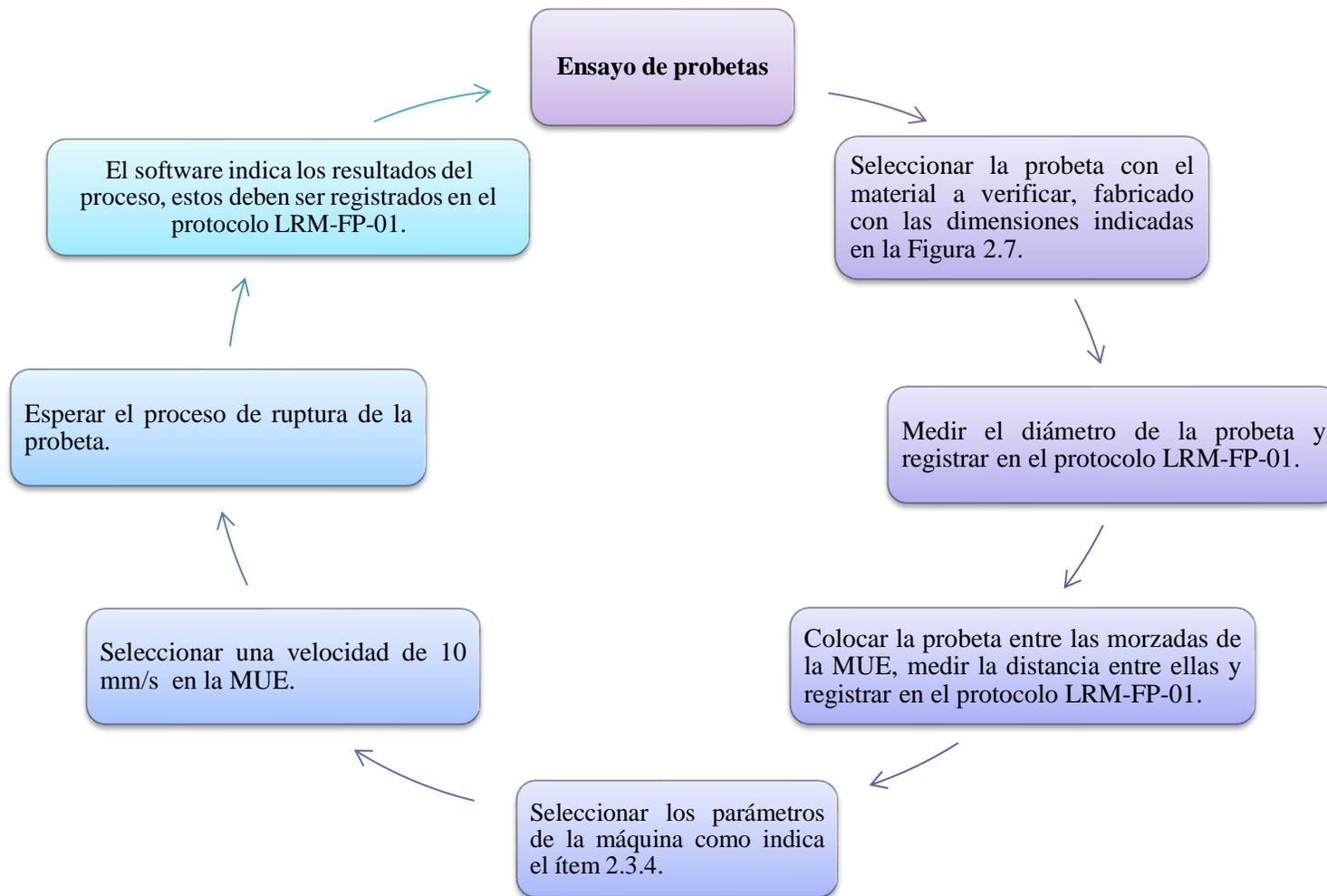


Figura 19. Proceso de ensayo de ruptura

CAPÍTULO III

ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Generalidades

El presente capítulo analiza los resultados de los ensayos de tensión de probetas de acero AISI 4340 obtenidas de acuerdo con los parámetros establecidos para ensayos de tensión. Se realiza el ensayo de ruptura de las 36 probetas divididas en 3 grupos, en los cuales varían ciertos parámetros como el diámetro de la probeta y la distancia de las mordazas de sujeción, para determinar la variación por cada uno de estas incertidumbres al momento de realizar el ensayo.

Los resultados se evaluarán con el método de varianza ANOVA con el fin de comprobar si los valores son compatibles y reproducibles y detectar tendencias en los futuros ensayos a realizar.

3.2 Análisis de ANOVA

Este análisis consiste en ejecutar una comparativa de los datos obtenidos del ensayo de tracción, con lo cual se procede a utilizar las fórmulas indicadas en el capítulo I, con lo que se quiere obtener la mejor interacción entre los resultados y comprobar que no existen diferencias significativas que pudieren afectar a los futuros resultados.

En base a este criterio se busca afirmar la hipótesis en donde se concluya que el f calculado es menor que el F crítico. Esta matriz se aplica para cada uno de los resultados obtenidos durante la toma de datos en los ensayos experimentales de tracción simulando un ambiente de rutina. En la siguiente Tabla 20. Indica los resultados de ANOVA para la carga máxima encontrada, los cuales cumplen con la hipótesis ya que el f calculado 1,14 es menor al F crítico 3,2849 y obteniendo un valor de P superior al 0,05

Tabla 20. Resultados ANOVA carga máxima

Fuente de variación	Suma de cuadrados (SS)	v	Cuadrado medio (MS)	f	P	Fcrit
Entre grupos	19035784,98	2	9,518E+06	1,14	0,333	3,2849
Intra grupo (residuales)	276220699,9	33	8,370E+06			
Total	295256484,9	35				

Adaptada de: [27]

En la siguiente Tabla 21. Indica los resultados de ANOVA para la carga máxima encontrada, dichos resultados cumplen con la hipótesis ya el que f calculado 1,29 es menor al F crítico 3,2849 y obteniendo un valor de P superior al 0,05.

Tabla 21. Resultados ANOVA esfuerzo máximo

Fuente de variación	Suma de cuadrados (SS)	v	Cuadrado medio (MS)	F	P	Fcrit
Entre grupos	2591,2799	2	1,296E+03	1,29	0,288	3,2849
Intra grupo (residuales)	33154,3535	33	1,005E+03			
Total	35745,6333	35				

Adaptada de: [27]

En la Tabla 22. Los resultados obtenidos cumplen con la hipótesis ya el que f calculado 0,08 es menor al F crítico 3,2849 y obteniendo un valor de P superior al 0,05.

Tabla 22. Resultados ANOVA módulo de elasticidad

Fuente de variación	Suma de cuadrados (SS)	v	Cuadrado medio (MS)	F	P	Fcrit
----------------------------	-------------------------------	----------	----------------------------	----------	----------	--------------

Entre grupos	24735851,95	2	1,237E+07	0,21	0,815	3,2849
Intra grupo (residuales)	1988094758	33	6,025E+07			
Total	2012830610	35				

Adaptada de: [27]

Los resultados de ANOVA mostrados en la Tabla 23., para la carga máxima encontrada, cumplen con la hipótesis ya el que f calculado 0,42 es menor al F crítico 3,2849 y obteniendo un valor de P superior al 0,05.

Tabla 23. Resultados ANOVA deformación axial

Fuente de variación	Suma de cuadrados (SS)	v	Cuadrado medio (MS)	F	P	Fcrit
Entre grupos	1,08467E-05	2	5,423E-06	0,42	0,658	3,2849
Intra grupo (residuales)	0,000422593	33	1,281E-05			
Total	0,00043344	35				

Adaptada de: [27]

3.3 Límite de precisión intermedia

Para analizar los resultados de cada ensayo de tensión, se crea una gráfica de dispersión y se examina el comportamiento de ruptura de cada ensayo. El comportamiento de ruptura de cada uno de los 36 ensayos se muestra en la gráfica.

Este parámetro se obtiene mediante las 36 mediciones realizadas en los ensayos de tracción, las mismas que se tomaron en condiciones de repetibilidad y reproducibilidad, este valor a obtener nos va a proporcionar un valor de precisión del proceso que se utilizó, el cual abarca todas las

posibles fuentes de incertidumbre o factores externos que pudieren haber existido y afectado a este ensayo que pueden existir en un laboratorio en condiciones normales. En la Tabla 24., tenemos el resultado de la desviación estándar de la repetibilidad “ S_r ”, la variación total del factor de agrupamiento “ S_i ”, el valor de precisión intermedia “ S_{lm} ” el cual debe ser multiplicado por el factor de precisión que corresponde a 2,8, obteniendo como resultado el límite de precisión intermedia para el parámetro de carga máxima del acero AISI 4340.

Tabla 24. Límite de precisión carga máxima

Parámetros	Resultado
S_r	2893,151 N
S_i	309,242 N
S_{lm}	2909,631 N
Factor de precisión	2,8
Límite de precisión intermedia	8146,968 N

En la Tabla 25. tenemos el resultado de la desviación estándar de la repetibilidad “ S_r ”, la variación total del factor de agrupamiento “ S_i ”, el valor de precisión intermedia “ S_{lm} ” el cual debe ser multiplicado por el factor de precisión que corresponde a 2,8, obteniendo como resultado el límite de precisión intermedia para el parámetro de esfuerzo máximo del acero AISI 4340.

Tabla 25. Límite de precisión esfuerzo máximo

Parámetros	Resultado
S_r	31,697 MPa
S_i	4,924 MPa
S_{lm}	32,077 MPa
Factor de precisión	2,8
Límite de precisión intermedia	89,815 MPa

En la Tabla 26. tenemos el resultado de la desviación estándar de la repetibilidad “ S_r ”, la variación total del factor de agrupamiento “ S_i ”, el valor de precisión intermedia “ S_{lm} ” el cual debe ser multiplicado por el factor de precisión que corresponde a 2,8, obteniendo como resultado el límite de precisión intermedia para el parámetro de módulo de elasticidad del acero AISI 4340.

Tabla 26. Límite de precisión de módulo de elasticidad

Parámetros	Resultado
S_r	7761,784 MPa
S_i	1997,444 MPa
S_{lm}	8014,679 MPa
Factor de precisión	2,8
Límite de precisión intermedia	22441,101 MPa

En la Tabla 27. tenemos el resultado de la desviación estándar de la repetibilidad “ S_r ”, la variación total del factor de agrupamiento “ S_i ”, el valor de precisión intermedia “ S_{lm} ” el cual debe ser multiplicado por el factor de precisión que corresponde a 2,8, obteniendo como resultado el límite de precisión intermedia para el parámetro de deformación axial del acero AISI 4340.

Tabla 27. Límite de precisión de deformación axial

Parámetros	Resultado
S_r	0,004 mm/mm
S_i	0,001 mm/mm
S_{lm}	0,004 mm/mm
Factor de precisión	2,8
Límite de precisión intermedia	0,010 mm/mm

3.4 Prueba de Tukey

Este método se utiliza para encontrar y establecer un intervalo de confianza para las diferencias entre los tres grupos de datos.

Esta herramienta sigue la hipótesis nula, que afirma que los valores promedios de ambas parejas son iguales. Para la hipótesis alterna indica que: los valores promedios entre parejas son diferentes. En las tablas se indica las diferencias entre los grupos de probetas y su evaluación basándose en el criterio de Tukey, la Tabla 28. parámetro de carga máxima, Tabla 29. parámetro de esfuerzo máximo, Tabla 30. parámetro de módulo de elasticidad y Tabla 31. deformación axial. Estos resultados se obtienen del formato LRM-FP-03 adjunto en el Anexo 10.

Tabla 28. Evaluación de Tukey para carga máxima

Descripción	Promedio (N)	Diferencia entre grupos	Diferencia abs (N)	Factor Tukey (Ta)	Evaluación (Dif < Ta)
Grupo 1	81319,516	G1 y G2	1497,710		Cumple
Grupo 2	79821,807	G1 y G3	1583,793	2898,08	Cumple
Grupo 3	79735,723	G2 y G3	86,084		Cumple

Tabla 29. Evaluación de Tukey para esfuerzo máximo

Descripción	Promedio (MPa)	Diferencia entre grupos	Diferencia abs (MPa)	Factor Tukey (Ta)	Evaluación (Dif < Ta)
Grupo 1	994,08	G1 y G2	13,622		Cumple
Grupo 2	1007,702	G1 y G3	20,403		Cumple

Grupo 3	1014,483	G2 y G3	6,781	Cumple
---------	----------	---------	-------	--------

Tabla 30. Evaluación de Tukey para módulo de elasticidad

Descripción	Promedio (MPa)	Diferencia entre grupos	Diferencia abs (MPa)	Factor Tukey (Ta)	Evaluación (Dif < Ta)
Grupo 1	201492,482	G1 y G2	1205,497		Cumple
Grupo 2	202697,979	G1 y G3	2017,692	7775,000	Cumple
Grupo 3	203510,174	G2 y G3	812,194		Cumple

Tabla 31. Evaluación de Tukey para deformación axial

Descripción	Promedio (mm/mm)	Diferencia entre grupos	Diferencia abs (mm/mm)	Factor Tukey (Ta)	Evaluación (Dif < Ta)
Grupo 1	0,055	G1 y G2	0,001		Cumple
Grupo 2	0,056	G1 y G3	0,001	0,004	Cumple
Grupo 3	0,057	G2 y G3	0,001		Cumple

3.5 Límites de control

Estos límites no ayudan como indicadores, los cuales nos muestran un rango estadístico previamente determinado. Los mismo que nos ayudan a controlar que los ensayos que se realicen posteriormente se encuentren vigilados y nos alerten de posibles resultados fallidos que no correspondan al material o a su vez que exista fallas en la máquina de ensayo descritas en las tablas desde la 32. a la 35. Estos indicadores son muy importantes ya que nos permiten

controlar el proceso de ensayo para el material estudiado en conjunto con la máquina de ensayo.

Tabla 32. Límite de control de carga máxima

Descripción	Límite de precisión intermedia	Coefficiente para calcular el límite	Resultado
Límite central	8146,968	1,128	9189,780
Límite de advertencia	8146,968	2,834	23088,507
Límite de acción	8146,968	3,686	30029,724

Tabla 33. Límite de control de esfuerzo máximo

Descripción	Límite de precisión intermedia	Coefficiente para calcular el límite	Resultado
Límite central	89,815	1,128	101,311
Límite de advertencia	89,815	2,834	254,536
Límite de acción	89,815	3,686	331,058

Tabla 34. Límite de control de módulo de elasticidad

Descripción	Límite de precisión intermedia	Coefficiente para calcular el límite	Resultado
Límite central	22441,10	1,128	25313,562

Límite de advertencia	22441,10	2,834	82717,897
Límite de acción	22441,10	3,686	63598,079

Tabla 35. Límite de control de deformación axial

Descripción	Límite de precisión intermedia	Coefficiente para calcular el límite	Resultado
Límite central	0,010	1,128	0,012
Límite de advertencia	0,010	2,834	0,029
Límite de acción	0,010	3,686	0,038

3.6 Hoja de datos

En la parte superior del formato LRM-FP-04, “hoja de datos de gráfico de control” Figura 20., se encuentra información sobre el estudio realizado, se describe datos sobre el tipo de característica de calidad, unidad de medida del estudio, método utilizado, periodo de inicio, nombre de laboratorio y el límite de precisión intermedia calculado mediante el estudio estadístico.

HOJA DE DATOS DE GRÁFICO DE CONTROL			
1. Característica de calidad:	Ensayo de tensión en acero AISI 4340		
2. Unidad de medida	N		
3. Método de análisis	Carga Máxima		
4. Periodo:	2024-01 en adelante		
Laboratorio:	Resistencia de materiales		
$\sigma_{(TO)}$ (límite de precisión intermedia (tiempo + operador))	8147,0	N	Valor obtenido mediante estudio

Figura 20. Información del estudio

En la sección en donde se ingresa los datos y se evalúa los resultados Figura 21., en esta sección indica lo siguiente: el número de muestras que se van a ir realizando y el valor promedio “X1” del parámetro a verificar, el mismo que se toma como referencia para la comparativa con las futuras pruebas. En los casilleros correspondientes al valor “X2” se ira escribiendo los valores futuros de las pruebas realizadas.

Rango “w” nos indica la diferencia entre el valor de nominal y el valor promedio de las mediciones, este resultado es el que se contrasta con los límites de advertencia y límite de acción. En la declaración de resultado no indica si el valor evaluado del ensayo de tensión está dentro de los parámetros la casilla se pinta de color verde y no encontrarse dentro de los parámetros la casilla se pinta de color rojo.

De encontrar valores fuera de los parámetros, se asumiría que el material corresponde a AISI 4340 o no cumple con las características necesarias. Otra posible causa puede ser atribuida a fallos en la máquina de ensayo universal por temas de calibración o sobrecargas en la celda.

En la Figura 21. se indica las celdas en donde se debe colocar los resultados obtenidos de los próximos ensayos a realizar.

Datos del ensayo (subgrupo n)	Valores observados		Rango (w)	Declaración de resultado
	x1 (promedio)	x2 (valor a verificar)		
1	80137,4	79973,3	1952,803879	Dentro de los parámetros
2	80137,4	80710,0		Dentro de los parámetros
3	80137,4	78184,6		Dentro de los parámetros
4	80137,4	79985,2	152,2568788	Dentro de los parámetros
5	80137,4	78649,0	1488,483879	Dentro de los parámetros
6	80137,4	48056,0	32081,43688	Fuera de parámetros - REVISAR
7				
8				

Figura 21. Sección 2 de hoja de control

En la Figura 22., detalla los límites de control calculados mediante el estudio realizado en presente documento, entre los que encontramos la línea central, límite de advertencia y el límite de acción, estos valores no deben ser modificados, solo son de carácter informativo que representan los valores ante los cuales se deben contrastar.

Media (W)		6068,62	
d2		1,128	ver tabla 4
$sl(TO) = w/d2$		5379,98	N.m
x ₁ : Análisis de rutina		OK	
x ₂ : Segundo análisis (diferente operario, diferente día)		OK	
a) Línea central =		9189,780	
D ₂ (acción)		3,686	ver tabla 4
b) Límites de acción:	LS	30029,724	N.m
D ₂ (2) (acción)		2,834	
c) límites de advertencia:	LS	23088,507	

Figura 22. Sección 2 de hoja de control 3

Este formato LRM-FP-04 “hoja de datos de gráfico de control” se encuentra implementada para el acero AISI 4340, y en específico para cada una de las siguientes características del material: carga máxima, esfuerzo máximo, módulo de elasticidad y deformación axial.

3.7 Gráfica de control

Se establece una gráfica de control en la cual se puede evidenciar el resultado del estudio de manera visual y más amigable al técnico que realiza el ensayo en donde se va a poder observar todos los ensayos consiguientes y los límites de control. Esta gráfica es complementaria a la hoja de datos, y de igual manera esta implementada para cada característica del material en estudio.

Este formato esta implementado en el software Excel, en el cual ya se encuentra automatizado, con la finalidad de que sea amigable con técnico a realizar los ensayos.

En la Figura 23. se puede apreciar cuatro líneas, la de color verde indica la tendencia de diferencias en los ensayos a futuro, la de color plomo es la línea central que se puede asumir como un promedio de las lecturas, la de color amarillo es el límite de advertencia que nos alerta que algún factor externo afecto en el ensayo y la de color rojo que nos indica el límite de acción o el límite máximo, los valores fuera de este indicador no son aceptados.

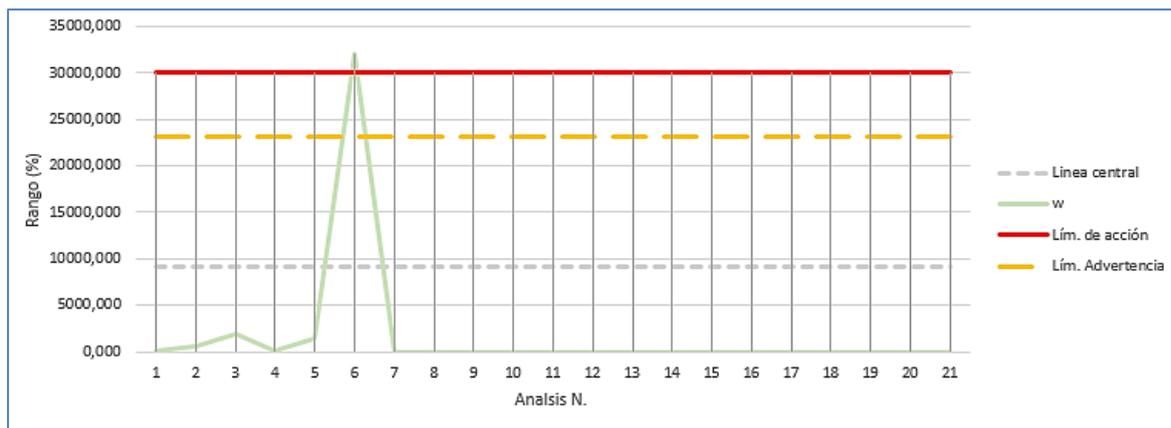


Figura 23. Gráfico de límites de control

Conclusiones

El presente proyecto de investigación ha proporcionado un profundo entendimiento de la importancia de la metrología en el campo de la mecánica de materiales, particularmente en los ensayos de tracción de aceros de baja aleación, con un enfoque específico en el AISI 4340. A partir de los análisis y experimentos realizados, se derivan las siguientes conclusiones:

- Este estudio ha destacado la crítica relevancia de la metrología en la obtención de mediciones precisas y confiables en los ensayos de tracción. La exactitud y precisión de las mediciones son esenciales para evaluar con precisión las propiedades mecánicas de los materiales, lo que a su vez influye en la seguridad y durabilidad de las estructuras y productos que utilizan estos aceros de baja aleación.
- La norma NTE INEN ISO 5725-6 se ha establecido como un marco de referencia fundamental para garantizar la reproducibilidad y repetibilidad en los ensayos de tracción. Esta norma es crucial para asegurar que diferentes laboratorios obtengan resultados comparables y confiables al utilizar los mismos métodos y equipos de medición.
- Para garantizar que los equipos de medición mantengan su precisión a lo largo del tiempo, es necesario implementar un sistema de aseguramiento metrológico, que incluye la calibración de la máquina de ensayo universal y la evaluación de los resultados de calibración detallados en la Tabla 12. Los resultados de calibración certificados proporcionan una base sólida para la validez de los ensayos, que se evaluaron con el error máximo permitido del 1% de la lectura, como indica el fabricante. Para monitorear estadísticamente la deriva, el fabricante recomienda una calibración cada 12 meses.
- Los resultados del análisis de ANOVA correspondientes a la Tabla 20. carga máxima, Tabla 21. esfuerzo máximo, Tabla 22. módulo de elasticidad y Tabla 23. deformación axial, se obtuvo un valor máximo de f calculado que corresponde a un valor de 1,14 que es el 34,7 % del F crítico, lo que significa que la variabilidad entre los tres grupos de

ensayos realizados es similar, por lo tanto, no existe diferencias significativas entre las medias

- Los resultados obtenidos al aplicar la prueba de Tukey en los ensayos de tensión para el acero de baja aleación AISI 4340, se evidencia que para los parámetros indicados en las tablas 28.; 29.; 30.; 31., carga máxima, esfuerzo máximo, módulo de elasticidad y deformación axial respectivamente, existe una mayor diferencia entre los resultados del grupo 1 versus del grupo 3, lo que indica que cuando existe una posición en donde la distancia entre las mordazas es superior a la media 92,3 mm los resultados son un poco más elevados. No se encontraron diferencias significativas por lo tanto todas las comparaciones son similares en términos de medida.
- El análisis de resultados de los ensayos de tracción revela la variabilidad inherente en las propiedades mecánicas del acero AISI 4340, incluyendo la resistencia a la tracción, esfuerzo máximo, deformación axial. La aplicación de principios metrológicos y la realización de ensayos de tracción rigurosa contribuyen directamente a la mejora de calidad. El análisis de varianza (ANOVA) ha demostrado que no hay diferencias significativas entre los grupos de ensayo, lo que significa que los resultados son compatibles y reproducibles. Esto confirma la robustez del método de ensayo utilizado. Los resultados de este proyecto de investigación contribuyen al aseguramiento metrológico en el campo de ensayos destructivos de aceros de baja aleación AISI 4340, lo que aporta a la calidad y confiabilidad de los resultados, beneficiando a la industria y la ingeniería en general.

Recomendaciones

- Se sugiere enfatizar la importancia de la adhesión y cumplimiento estricto de las normativas metrológicas, en particular la norma NTE INEN ISO 5725-6, en todos los laboratorios y centros de investigación que realicen ensayos de tracción de aceros de baja aleación. Esto garantizará la uniformidad en los métodos de medición y la comparabilidad de los resultados.

- Se recomienda la implementación de programas de aseguramiento metrológico en los laboratorios que realicen ensayos de tracción. Estos programas deben incluir la calibración periódica de las máquinas de ensayo universal y la documentación de resultados de calibración certificados. Esto asegurará que los equipos de medición mantengan su precisión a lo largo del tiempo.

- Es recomendable que los laboratorios sigan utilizando el análisis de varianza (ANOVA) para evaluar la variabilidad de los resultados de los ensayos de tracción. Este análisis proporciona información útil sobre la reproducibilidad y la consistencia de los resultados, lo que puede ser útil para la toma de decisiones en la industria y el control de calidad.

- Se sugiere fomentar la colaboración y el intercambio de resultados y conocimientos entre laboratorios, instituciones académicas e industrias relacionadas con la mecánica de materiales. Esto puede llevarse a cabo a través de conferencias, seminarios, publicaciones y redes de investigación, con el objetivo de enriquecer la base de conocimientos y mejorar las prácticas metrológicas en el campo.

- Es importante promover la educación en metrología entre estudiantes de ingeniería y profesionales que trabajan en el campo de la mecánica de materiales. Esto puede incluir cursos de formación en metrología y la difusión de material educativo relacionado con la metrología aplicada a ensayos de tracción.

- Para mejorar nuestra comprensión de las propiedades mecánicas de los aceros de baja aleación y crear métodos de ensayo aún más precisos y confiables, se requiere investigación adicional en el campo de los ensayos de tracción.

Lista de Referencias

- [1] Organización Internacional de Normalización, «ISO 5725-1. Exactitud (veracidad y precisión) de los resultados y métodos de medida.- Parte 1: Principios generales y definiciones,» 2005.
- [2] Organización Internacional de Normalización, «ISO 5725-6: Exactitud (veracidad y precisión) de los resultados y métodos de medida - Parte 6: Utilización en la práctica de los valores de exactitud,» 2006.
- [3] J. Chin, «Plan de calidad para el aseguramiento metrológico,» Universidad del Azuay, 2011.
- [4] A. Creus, Instrumentación Industrial, Octava ed., Marcombo, 1979.
- [5] E. Gonzalez, «Reducción en la generación de impurezas de aluminio por cambio de geometría en el área de cierre de la carcasa de guía para amortiguadores Monotubo Modular Concept,» CIATEQ, A. C. Centro de Tecnología Avanzada, 2021.
- [6] J. Robles y D. Del Campo, «La metrología, motor de innovación tecnológica y desarrollo industrial,» 10 Junio 2010. [En línea]. Available: <https://www.e-medida.es/numero-1/la-metrologia-motor-de-innovacion-tecnologica-y-desarrollo-industrial/>.
- [7] G. Cabaña, V. Rabi, M. Paz y M. Calcagni, Introducción desde una perspectiva latinoamericana., Centro de Análisis Socio Ambiental (CASA), 2021.
- [8] S. Parodi, M. Kappes, J. L. Otegui, R. Carranza y A. Aguirre, «Obtención de aceros de baja aleación con diferentes contenidos de Ni y similares microestructuras y propiedades mecánicas,» *Revista Materia* , vol. 23, nº 2, pp. 4-12, 2018.
- [9] L. Winter y G. Abreu, «Propuesta de Plan Operativo y Sistema de Gestión de la Calidad para el Laboratorio,» 2018.
- [10] D. Skoog, Principios de Análisis Instrumental, Sexta ed., PARANINFO, S.A., 2009, p. 965.
- [11] A. Alcantar, «Usos y aplicaciones del plasma rico en plaquetas en la reparación de tejidos,» 2021.
- [12] A. Cardet, «Propuesta de diseño de dispositivo para ensayar uniones remachadas,»

2020.

- [13] D. Forero y D. Santana, «Diseño de maquina termoformadora didactica para el laboratorio de materiales de ingeniería de la Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas,» 2018.
- [14] G. Arguello Villagómez, «Máquina Universal de ensayos: Sistema de supervisión y control,» 2023.
- [15] American Society for Testing and Materials, «Standard test methods for tension testing of metallic material E8/E8M,» ASTM International, Estados Unidos, 2019.
- [16] A. Cañizares y J. Choez, «Implementación de un módulo didáctico para determinar la resistencia mecánica de los materiales para el laboratorio de la Universidad Técnica De Cotopaxi Extensión La Maná,» 2023.
- [17] C. Heredero, J. Agius, S. Romero y S. Salgado, Organización y transformación de los sistemas de información en la empresa, ESIC, 2019.
- [18] C. Saavedra Trujillo, «Consenso colombiano de atención, diagnóstico y manejo de la infección por SARS-COV-2/COVID-19 en establecimientos de atención de la salud. Recomendaciones basadas en consenso de expertos e informadas en la evidencia,» *Infectio*, vol. 24, n° 3, 2020.
- [19] V. Villalobos Chumpitaz, Implementación de un sistema de gestion ambiental en la compañía minera Lincuna, SAC–Recuay, 2021.
- [20] Y. López, Propuesta de diseño para el sistema de gestión de seguridad y salud en el trabajo para la empresa Ferretería Norue S.A.S, Universidad ECCI, 2021.
- [21] J. Grisales Alvarez, Fabricación de scaffolds con propiedades magnéticas usando micropartículas de magnetita provenientes de desechos de la minería aluvial, Unviersidad Nacional de Colombia, 2023.
- [22] W. Escobar Aumala y J. Vallejo Soliz, «Diseño y simulación de un prototipo de dron fumigador con capacidad de ocho litros para cultivo de frutilla,» 2023.
- [23] M. Solar Jara, «Resistencia a la flexion en vigas de concreto $f'c=210$ kg/cm², al adicionar en un 5% y 10% de fibra de agave lechuguilla,» 2018.
- [24] A. Martínez, «Desarrollo de la docuemntación relativa a los recursos del LAM-UTA acorde a la norma ISO/IEC 17025-2018,» 2023.

- [25] C. Chambergo Larrea y A. Aguinaga Paz, Incidencia de los protocolos de medición y verificación en la implementación de sistemas de gestión de la energía., Dehesa, 2020.
- [26] A.A., «Análisis de Varianza,» [En línea]. Available: <https://www.coursehero.com/file/44476445/Analisis-de-varianza-labdoc/>.
- [27] B. M. & U. Örnemark, «Una guía de laboratorio para validación de métodos y temas relacionados,» 2014. [En línea]. Available: https://www.eurachem.org/images/stories/Guides/pdf/MV_guide_2nd_ed_ES.
- [28] S. Rocha, «Procedimiento Selección y Verificación de Métodos de Calibración,» 01 06 2020. [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/document/472838298/LC-PC-02-PROCEDIMIENTO-SELECCION-Y-VERIFICACION-DE-METODOS-DE-CALIBRACION>.
- [29] Liferder, «Prueba de Tukey: en qué consiste, caso de ejemplo, ejercicio resuelto.,» 15 12 2022. [En línea]. Available: <https://www.liferder.com/prueba-de-tukey/>.
- [30] I. Mahecha Ayala, lan de desarrollo para el laboratorio de metrología de la sede principal de la Universidad Santo Tomás, Universidad Santo Tomás, 2022.
- [31] GRUPO ACEIN |, «Aceros bonificados | GRUPO ACEIN,» [En línea]. Available: <https://grupoacein.com/bluesteelcorp/productos/aceros-bonificados/>.
- [32] Bohman, «Aceros y Materiales,» [En línea]. Available: <https://online.fliphtml5.com/dljug/alyk/#p=1>.

Anexos



METRÓLOGOS ASOCIADOS DEL ECUADOR

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN Y ENSAYO

LABORATORIO DE FUERZA

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

Certificado No: LFUE-23-023-MUN DATOS DEL CLIENTE Nombre: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA Dirección: Quito, Av. Morán Valverde y Rumichaca Representante: Ing. Cristhian Leiva Teléfono: 099 975 2039 Ubicación: Laboratorio de Resistencia de Materiales	Orden de Ingreso No.: 3790 INSTRUMENTO BAJO PRUEBA Descripción⁽¹⁾: MAQUINA UNIVERSAL DE ENSAYO Marca⁽²⁾: TEST RESOURCES Modelo⁽²⁾: 122DFEY-SCK-B Serie⁽²⁾: 582115 Código⁽²⁾: — Rango⁽²⁾: (0 a 150) kN Resolución⁽²⁾: 0,1 N
--	--

PROCEDIMIENTO UTILIZADO:
Por Lectura Directa del Patrón de acuerdo al Procedimiento PR-LFUE-01

CONDICIONES AMBIENTALES	FECHA DE CALIBRACIÓN
Lugar de Calibración: SITIO	Fecha de Recepción: 2023-05-30
Temperatura ambiente: 21,1 °C	Inicio de Calibración: 2023-05-30
Humedad Relativa: 45,2 % HR	Fin de Calibración: 2023-05-30
Presión Atmosférica: 716,0 Pa	Próxima Calibración: —
	N° días de Cal.: 1
	Fecha de Emisión: 2023-07-04

INSTRUMENTOS PATRÓN UTILIZADOS

Descripción:	TRANSDUCTOR DE FUERZA	TRANSDUCTOR DE FUERZA	LECTOR
Marca:	AEP TRANSDUCERS	AEP TRANSDUCERS	AEP TRANSDUCERS
Modelo:	KAL	KAL	MP16PLUS
Serie:	162063	162065	6025
Num. Certificado:	LAT 093 2323F	LAT 093 2323F	LAT 093 2323F
Fecha de Cal.:	2023-01-10	2023-01-10	2023-01-10
P. de prox. Cal.:	2025-01-10	2025-01-10	2025-01-10
Trazabilidad:	AEP TRANSDUCERS	AEP TRANSDUCERS	AEP TRANSDUCERS

DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA CALIBRACIÓN

La Incertidumbre de Medida reportada es la incertidumbre expandida y se ha obtenido multiplicando la incertidumbre estándar de medida por el factor de cobertura $k=2$ que, para una distribución normal corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95,45%; y, se la estimó en base a: "Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida (GUM)" de la ISO. En ella se tuvieron en cuenta las fuentes de incertidumbre que aporta el instrumento patrón, el instrumento bajo prueba y el método.

Los resultados de este Certificado de Calibración son válidos únicamente para el instrumento indicado y bajo las condiciones de referencia declaradas. Los resultados de la calibración y sus incertidumbres se exponen en las páginas siguientes. El intervalo de calibración (confirmación metrológica) del instrumento es responsabilidad del cliente.

Las mediciones fueron realizadas por personal autorizado de nuestro laboratorio que se basan a patrones de referencia que mantienen trazabilidad al Sistema Internacional SI, a través de patrones nacionales o internacionales. Se utiliza procedimientos desarrollados por la Compañía METASDELECUADOR CÍA. LTDA.

Este certificado de calibración no debe ser reproducido parcialmente, la reproducción total deberá hacerse con la autorización escrita de la Compañía METASDELECUADOR CÍA. LTDA.

Este laboratorio no se responsabiliza de los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado del instrumento calibrado y del certificado. ⁽¹⁾ METASDELECUADOR CÍA. LTDA. no es responsable por la información proporcionada por el cliente. ⁽²⁾ Información tomada de las especificaciones proporcionadas por el fabricante.

La trazabilidad del laboratorio de la Compañía METASDELECUADOR CÍA. LTDA. está disponible para el cliente si lo requiere.



F-CAL-AT20-71-1 Página: 1 de 3

www.calibracion-metas.com

 099 975 2039 / 099 975 2040

 informacion@calibracion-metas.com

 Quito, Manglarito 514-208 y
 Tembo-Cajuma (San Benito Parí)

Anexo 1. Información del certificado de calibración



METRÓLOGOS ASOCIADOS DEL ECUADOR
METASDELECUADOR CIA. LTDA.

CONTRIBUYENDO AL SISTEMA DE CALIDAD ECUATORIANO

LABORATORIO DE FUERZA

RESULTADOS DE CALIBRACIÓN

Certificado No.: **LFUE-23-023-MUN**

Requerimientos de Calibración

Rango de Medición:	0 a 150 kN	Intervalo de Calibración:	15 kN 150 kN
--------------------	------------	---------------------------	--------------

Inspección del MEDP

Estado	Buena <input checked="" type="checkbox"/>	Mala <input type="checkbox"/>
Funcionamiento	Buena <input checked="" type="checkbox"/>	Mala <input type="checkbox"/>

Descripción:

El funcionamiento evaluado en blanco, responde a la aplicación de fuerza de la Máquina Universal de Ensayo.

Resultados de la Calibración

Indicación de MEDP	COMPRESION					Promedio	Error de medición
	1ra Serie Posición 0°	2da Serie Posición 120°	3ra Serie Posición 140°		4ta Serie con accesorio 140°		
	Ascenso	Ascenso	Ascenso	Descenso	Ascenso		
kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN
0	0.00	0.00	0.00	—	—	0.00	0.00
15	15.100	14.985	14.975	—	—	15.020	-0.02
30	30.145	30.050	30.010	—	—	30.068	-0.07
45	45.085	44.960	45.030	—	—	45.026	-0.03
60	60.450	60.235	60.085	—	—	60.250	-0.20
75	75.360	75.305	75.210	—	—	75.305	-0.31
90	90.415	90.315	90.220	—	—	90.317	-0.32
105	105.48	105.71	105.66	—	—	105.52	-0.52
120	120.85	120.65	120.69	—	—	120.83	-0.83
135	135.87	135.91	135.56	—	—	135.78	-0.78
150	150.88	150.98	150.84	—	—	150.93	-0.93

Indicación de MEDP	Errores de Medición relativos en %					Incertidumbre de medición relativa U% (k=2)	Incertidumbre de medición U (k=2)	CLASE DE EXACTITUD
	Exactitud	Repetibilidad	Reversibilidad	Resolución Relativa	Cera			
kN	g	b	v	a	fD			
15	0.14	0.23	—	0.07	0.00	2.6	0.40	0.5
30	0.20	0.45	—	0.30	0.00	0.73	0.32	0.5
45	0.07	0.30	—	0.22	0.00	0.36	0.16	0.5
60	0.42	0.64	—	0.17	0.00	0.46	0.27	0.5
75	0.41	0.61	—	0.13	0.00	0.13	0.10	0.5
90	0.35	0.22	—	0.11	0.00	0.17	0.15	0.5
105	0.49	0.50	—	0.10	0.00	0.38	0.40	0.5
120	0.68	0.21	—	0.08	0.00	0.16	0.19	1
135	0.57	0.26	—	0.07	0.00	0.20	0.27	1
150	0.62	0.07	—	0.07	0.00	0.080	0.12	1

Medida en Máquina de Ensayo tipo 100000

Declaración de Conformidad

Requisito del cliente: Si requiere:



Realizado por:

Téc. Darwin Lalangu
 Técnico del Laboratorio de Fuerza TLD

Aprobado por:

Téc. Oscar Tipán
 Jefe del Área de Calidad JAC

Anexo 2. Resultados de certificado de calibración

New calibration
This calibration performed Out of System at Test Resources

Procedure Followed based on ASTM E-4

*** Tolerance - Load:**
Plus or minus 1% of reading up to 100% of range

Anexo 3. Valor de tolerancia Test Resources



Anexo 4. Probeta acero AISI 4340



Anexo 5. Probetas de acero AISI 4340 mecanizadas



Anexo 6. Probeta después de la ruptura

Catálogo Comercial

Propiedades del Acero

Propiedades mecánicas

ø mm.	Resistencia a la tracción MPa	Límite elástico MPa	% elongación	Tenacidad Kv a 20° C (J)
d ≤ 16	1200 - 1400	≥ 1000	≥ 9	≥ 35
16 < d ≤ 40	1100 - 1300	≥ 900	≥ 10	≥ 45
40 < d ≤ 100	1000 - 1200	≥ 800	≥ 11	≥ 45
100 < d ≤ 160	900 - 110	≥ 700	≥ 12	≥ 45
160 < d ≤ 250	800 - 950	≥ 600	≥ 13	≥ 45
250 < d ≤ 500	740 - 890	≥ 540	≥ 14	≥ 45
500 < d ≤ 750	690 - 840	≥ 490	≥ 15	≥ 40

* Las propiedades expresadas en la tabla anterior son valores típicos y de carácter informativo, ya que en este tipo de material se garantiza es la dureza; si se desea solicitar valores mecánicos específicos solicitamos se comunique con nuestro departamento técnico.

Características físicas

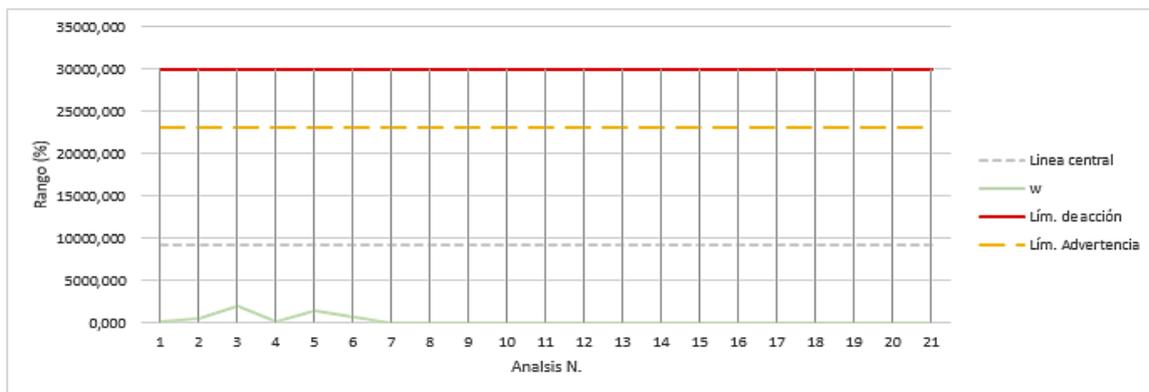
Valores a temperature ambiente:

Modulo de elasticidad N/mm ²	210000
Densidad g/cm ³	7,84
Conductividad térmica W/m·K	37,7
Calor específico J/g·K	0,46

Anexo 7. Ficha técnica de acero AISI 4340

HOJA DE DATOS DE GRÁFICO DE CONTROL				
1. Característica de calidad:		Ensayo de tensión en acero AISI 4340		
2. Unidad de medida		N		
3. Método de análisis		Carga Máxima		
4. Periodo:		2024-01 en adelante		
Laboratorio:		Resistencia de materiales		
$\sigma_{(T0)}$ (límite de precisión intermedia (tiempo + operador))		8147,0	N	Valor obtenido mediante estudio
Datos del ensayo (subgrupo n)	Valores observados		Rango (w)	Declaración de resultado
	x1 (promedio)	x2 (valor a verificar)		
1	80137,4	79973,3	164,1008788	Dentro de los parámetros
2	80137,4	80710,0	572,6101212	Dentro de los parámetros
3	80137,4	78184,6	1952,803879	Dentro de los parámetros
4	80137,4	79985,2	152,2568788	Dentro de los parámetros
5	80137,4	78649,0	1488,483879	Dentro de los parámetros
6	80137,4	48056,0	32081,43688	Fuera de parámetros - REVISAR
7				

Anexo 8. Matriz de hoja de datos



Anexo 9. Gráfica de control

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1Q5A9FPuAouUzS879yoWI56hGJjHQck8p/edit?usp=sharing&oid=111868118016323703857&rtpof=true&sd=true>

Anexo 10. Enlace del formato para el aseguramiento metrológico de ensayos.