

**ESTUDIO DE LA RELACIÓN EXISTENTE ENTRE LAS CURVAS DE FATIGA
UNIVERSAL E INDENTACIÓN INSTRUMENTADA PARA MATERIALES
METÁLICOS**

**MANUEL DAVID ESPINEL FERNÁNDEZ
WILVER YAMID OBREGÓN CRISTIANO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2019

**ESTUDIO DE LA RELACIÓN EXISTENTE ENTRE LAS CURVAS DE FATIGA
UNIVERSAL E INDENTACIÓN INSTRUMENTADA PARA MATERIALES
METÁLICOS.**

**MANUEL DAVID ESPINEL FERNÁNDEZ
WILVER YAMID OBREGÓN CRISTIANO**

**TRABAJO PRESENTADO
PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO MECANICO**

**DIRECTOR:
ALBERTO DAVID PERTUZ COMAS
INGENIERO MECANICO, PhD.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2019

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios por guiarnos a lo largo de esta etapa, ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad.

Al profesor Alberto Pertuz por su orientación, seguimiento y apoyo brindado.

A la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Industrial de Santander, por la ayuda suministrada para realizar el montaje de las probetas de indentación.

Agradecemos al taller de Diseño Industrial de la Universidad Industrial de Santander y su personal, por la colaboración suministrada para realizar el pulido de las probetas de fatiga.

A los laboratorios de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander por el préstamo de la maquina universal MTS Bionix® Servohydraulic y máquina de Indentación Bruker UMT Tribolab.

A nuestros profesores de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander por brindarnos las bases para poder desarrollar este proyecto.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios por darme fortaleza para cumplir esta meta tan importante en mi vida.

A mis padres Luis Espinel y Helena Fernández por su apoyo incondicional, consejos e inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo, lo cual me ha ayudado en todo momento de mi carrera y afrontar los momentos difíciles.

A mis hermanos por acompañarme en todos los momentos, al siempre escucharme y aportarme consejos que hacen de mí una mejor persona.

A mis amigos por apoyarme, compartir sus conocimientos y hacer llevadera esta etapa.

A mi compañero de proyecto, por haber logrado nuestro objetivo con mucha perseverancia y brindarme su amistad.

Manuel David Espinel Fernández

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A mis padres y mi hermana, por haberme brindado el apoyo, el ánimo, el amor y la comprensión durante todos estos años de estudio.

A mi novia Kato, por haber estado conmigo durante todo este proceso, por apoyarme y ser incondicional.

A mi tío Omar, por haberme inspirado y enseñarme que a pesar de todas las dificultades que nos ponga la vida siempre debemos mirar para el frente y seguir adelante.

A mi compañero de proyecto, por la amistad de todos estos años hasta el día de hoy y por el trabajo en equipo que nos permitió llegar a estas instancias.

Wilver Yamid Obregón Cristiano

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	18
1. OBJETIVOS	21
1.1. OBJETIVO GENERAL	21
1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	21
2. MARCO TEORICO	22
2.1. ENSAYO DE TRACCIÓN	22
2.2. FATIGA.....	23
2.2.1. Fases de la fatiga.....	24
2.2.2. Ensayo de fatiga, curva $S-N_f$	25
2.2.3. Fatiga en bajos ciclos..	27
2.3. INDENTACIÓN	29
2.3.1. Modelo de Tabor.....	30
2.4. INDENTACIÓN INSTRUMENTADA	31
2.5. MICROESTRUCTURA DE LOS MATERIALES.....	34
3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	35
3.1. MATERIALES METÁLICOS	35
3.1.1. Acero SAE 1045.	35
3.1.2. Aluminio 6063 T5.....	36
3.2. ENSAYO DE TRACCIÓN	37
3.3. ENSAYO DE FATIGA POR METODO TRADICIONAL.....	37
3.3.1. Descripción de las probetas.....	37
3.3.2. Recepción y medición de las probetas.	38
3.3.3. Procedimiento del ensayo de fatiga.	38
3.3.4. Construcción de la curva S vs N_f	40
3.3.5. Construcción de la curva ϵ vs N_f	41
3.4. ENSAYO DE INDENTACION INSTRUMENTADA	41
3.4.1. Descripción de las probetas.....	41
3.4.2. Procedimiento del ensayo por Indentación instrumentada.	41
3.5. PRUEBA METALOGRAFICA	43

4.	RESULTADOS	44
4.1.	RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN	44
4.2.	RESULTADOS DEL ENSAYO DE FATIGA POR EL MÉTODO CONVENCIONAL	46
4.2.1.	Carga y descarga.	46
4.2.2.	Histéresis.	47
4.2.3.	Resultados ensayo de fatiga plástica.....	49
4.2.4.	Tipo de fractura.....	53
4.3.	RESULTADOS DEL ENSAYO DE INDENTACIÓN	54
4.3.1.	Curva carga vs profundidad.....	54
4.4.	METALOGRAFIA.....	56
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	58
5.1.	ENSAYO DE TRACCIÓN	58
5.2.	ENSAYO DE FATIGA POR EL MÉTODO CONVENCIONAL.....	58
5.2.1.	Carga y descarga.	58
5.2.2.	Histéresis.	58
5.2.3.	Curva de fatiga plástica $S-N_f$	60
5.2.4.	Curva de deformación versus número de ciclos ϵ vs N_f	61
5.2.5.	Tipo de fractura.....	61
5.3.	ENSAYO DE INDENTACIÓN INSTRUMENTADA	61
5.4.	METALOGRAFÍA.....	63
5.5.	ANÁLISIS DE LA COMPARACIÓN ENTRE FATIGA POR HISTÉRESIS E INDENTACIÓN INSTRUMENTADA	63
6.	CONCLUSIONES.....	74
7.	RECOMENDACIONES.....	76
	BIBLIOGRAFIA	77
	ANEXOS.....	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Curva esfuerzo versus deformación para un acero.....	22
Figura 2. Superficie de fractura de un material sometido a fatiga.	23
Figura 3. Esfuerzos de fatiga con tensiones variables cíclicamente.	25
Figura 4. Ciclo de histéresis a) Reblandecimiento por ciclos de carga b) Endurecimiento por ciclos de carga.	28
Figura 5. Sección transversal del perfil de una superficie durante y después de la indentación.....	29
Figura 6. Curva de carga vs Desplazamiento producida durante el contacto..	32
Figura 7. Curvas de carga-desplazamiento con comportamiento: a) plástico, b) elastoplástico, c) elástico..	33
Figura 8. Medidas probetas acero SAE 1045 en milímetros.	37
Figura 9. Medidas probetas aluminio 6063 en milímetros.....	38
Figura 10. Máquina universal de ensayos MTS Bionix® Servohydraulic Test Systems Model 370.02.	39
Figura 11. Máquina de Indentación Bruker UMT Tribolab.....	42
Figura 12. Tracción, curva esfuerzo vs deformación, a) aluminio, b) acero.	44
Figura 13. Fuerza vs ciclos del aluminio.	46
Figura 14. Fuerza vs deformación aluminio, a) 82 ciclos, +- 0.4236 mm, b) 3501 ciclos, +- 0.235 mm.....	47
Figura 15. Fuerza vs deformación acero, a) 156 ciclos, +- 0.5 mm, b) 2527 ciclos, +- 0.281 mm.....	48
Figura 16. Curva S-N _f en zona de bajos ciclos, a) aluminio, b) acero.	51
Figura 17. Curva ϵ vs N _f zona de bajo ciclos a) aluminio, b) acero.	52
Figura 18. fractura del aluminio.....	53
Figura 19. Fractura del acero AISI 1045.	53
Figura 20. Indentacion del aluminio, a) 7000 g, 0.138 mm.	55
Figura 21. Indentacion del acero, a) 5000 g, 0.122 mm.....	55
Figura 22. Metalografía del aluminio 6063.	56

Figura 23. Metalografía del acero AISI 1045 a) microscopia óptica a 250x b) microscopia óptica 1000x	57
Figura 24. Histéresis del aluminio, 82 ciclos, +- 0.42361, primeros ciclos.	59
Figura 25. Histéresis del acero, 191 ciclos, +- 0.5, primeros ciclos.....	59
Figura 26. Histéresis primer ciclo.	64
Figura 27. Indentación primer ciclo.	64
Figura 28. Área vs deformación, Fatiga plástica del a) aluminio, b) acero.....	65
Figura 29. Área vs deformación, indentación del a) aluminio, b) acero.....	67
Figura 30. Carga versus deformación por Fatiga plástica para el a) aluminio, b) acero.....	68
Figura 31. Carga versus deformación por indentación para el a) aluminio, b) acero.	69
Figura 32. Fatiga por indentación y fatiga plástica, carga vs ciclos, aluminio.	72
Figura 33. Fatiga por indentación y fatiga plástica, carga vs ciclos, acero.....	73

LISTA DE TABLAS

Tabla No. 1 Composición química del acero SAE 1045.....	35
Tabla No. 2 Propiedades mecánicas del acero SAE 1045.	35
Tabla No. 3 Composición química del aluminio 6063.....	36
Tabla No. 4 Propiedades mecánicas del aluminio 6063 T5.	36
Tabla No. 5 Deformación hallada al 90% de σ_{Max}	40
Tabla No. 6 Condiciones para el ensayo de fatiga.	40
Tabla No. 7 Condiciones para el ensayo de indentación.	42
Tabla No. 8 Esfuerzo ultimo.	45
Tabla No. 9 Dureza experimental, dureza teórica y error encontrado.....	45
Tabla No. 10 Deformaciones ensayos fatiga convencional.....	46
Tabla No. 11 Datos generales del aluminio.....	49
Tabla No. 12 Datos generales del acero.	50
Tabla No. 13 Carga para los ensayos de aluminio y acero.	54
Tabla No. 14 Calculo experimental de dureza y esfuerzo ultimo.....	56
Tabla No. 15 pendiente de descarga curva P-h.	62
Tabla No. 16 Fatiga plástica: Área, carga, deformación, recuperación elástica para aluminio y acero.....	65
Tabla No. 17 Indentación instrumentada: Área, carga, deformación, recuperación elástica para aluminio y acero.....	66
Tabla No. 18 Áreas equivalentes de indentación a histéresis del aluminio.	72
Tabla No. 19 Áreas equivalentes de indentación a histéresis del acero.	73

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Probetas de aluminio y acero para el ensayo de fatiga a bajos ciclos. .80	80
Anexo 2. Probeta de aluminio para el ensayo de indentación.80	80
Anexo 3. Ensayo de tracción del aluminio.81	81
Anexo 4. Ensayo de tracción del acero.81	81
Anexo 5. Histéresis del aluminio a 82 ciclos y una deformación de 0.4236 mm, curva carga vs deformación.82	82
Anexo 6. Histéresis del aluminio a 609 ciclos y una deformación de 0.29075 mm, curva carga vs deformación.82	82
Anexo 7. Histéresis del aluminio a 1656 ciclos y una deformación de 0.27 mm, curva carga vs deformación.83	83
Anexo 8. Histéresis del aluminio a 3279 ciclos y una deformación de 0.235 mm, curva carga vs deformación.83	83
Anexo 9. Datos obtenidos de las pruebas de fatiga plástica del aluminio.84	84
Anexo 10. Curva S-N _f en zona de bajos ciclos del aluminio.85	85
Anexo 11. Curva ϵ vs N _f zona de bajo ciclos del aluminio.85	85
Anexo 12. Histéresis del acero a 156 ciclos y una deformación de 0.5 mm, curva carga vs deformación.86	86
Anexo 13. Histéresis del acero a 691 ciclos y una deformación de 0.351 mm, curva carga vs deformación.86	86
Anexo 14. Histéresis del acero a 1673 ciclos y una deformación de 0.3 mm, curva carga vs deformación.87	87
Anexo 15. Histéresis del acero a 2537 ciclos y una deformación de 0.285 mm, curva carga vs deformación.87	87
Anexo 16. Datos obtenidos de las pruebas de fatiga plástica del acero.88	88
Anexo 17. Curva S-N _f en zona de bajos ciclos del acero.89	89
Anexo 18. Curva ϵ vs N _f zona de bajo ciclos del acero.89	89
Anexo 19. Indentación instrumentada del aluminio con una carga de 7000 grs, curva carga vs profundidad.90	90

Anexo 20. Indentación instrumentada del aluminio con una carga de 5000 grs, curva carga vs profundidad.....	90
Anexo 21. Indentación instrumentada del aluminio con una carga de 3000 grs, curva carga vs profundidad.....	91
Anexo 22. Indentación instrumentada del aluminio con una carga de 2000 grs, curva carga vs profundidad.....	91
Anexo 23. Indentación instrumentada del acero con una carga de 5000 grs, curva carga vs profundidad.	92
Anexo 24. Indentación instrumentada del acero con una carga de 3000 grs, curva carga vs profundidad.	92
Anexo 25. Indentación instrumentada del acero con una carga de 2000 grs, curva carga vs profundidad.	93
Anexo 26. Indentación instrumentada del acero con una carga de 1000 grs, curva carga vs profundidad.	93
Anexo 27. Metalografía del aluminio.	94
Anexo 28. Metalografía del acero.	94

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO DE LA RELACIÓN EXISTENTE ENTRE LAS CURVAS DE FATIGA UNIVERSAL E INDENTACIÓN INSTRUMENTADA PARA MATERIALES METÁLICOS. *

AUTORES:

Manuel David Espinel Fernández

Wilver Yamid Obregón Cristiano**

PALABRAS CLAVE: Indentación instrumentada, Fatiga, Ciclos bajos, histéresis, dureza.

DESCRIPCIÓN: En este estudio se compara la curva de fatiga en zona de ciclos bajos construida por un método convencional y se halla una relación con la prueba de carga y descarga en indentación instrumentada para un acero SAE 1045 y aluminio 6063. Para ello se realizan ensayos de tensión-compresión en la máquina universal MTS Bionix® aplicando la norma ASTM E606 con una deformación fija para cada ensayo, se utilizan probetas cilíndricas elaboradas bajo la norma ASTM E8. Los ensayos de indentación instrumentada se efectúan teniendo como guía la norma ASTM-E384-17 en la máquina de Indentación Bruker UMT Tribolab, las probetas tienen las mismas características de las usadas en el ensayo de fatiga plástica y montadas en un polímero. Los datos obtenidos por parte del ensayo de tensión-compresión son representados en la curva $S-N_f$ y la de carga versus la deformación conocida como histéresis, del ensayo de indentación instrumentada se obtiene la curva carga versus deformación, con la cual es posible por medio de relaciones conocidas calcular algunas propiedades mecánicas. A partir de estos resultados se comparan las curvas carga versus deformación de ambos y se halla una constante de corrección de la energía absorbida cuando se deforma el material, con esto se encuentra una equivalencia de las deformaciones y ya que la deformación está relacionada con la carga y el número de ciclos se obtiene una curva carga vs número de ciclos para el método de indentación. Por último, se comparan las gráficas de fatiga, para el aluminio se tuvo un comportamiento bastante similar y para el acero la curva resulto un poco más alejada, pero con una forma igual, esto puede deberse a que este se encontró en una zona de mayores ciclos donde hay mayor dispersión de puntos.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingeniería Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director Dr. David Alberto Pertuz Comas, PhD, Ingeniero Mecánico.

ABSTRACT

TITLE: STUDY OF THE EXISTING RELATIONSHIP IN THE CURVE OF UNIVERSAL FATIGUE AND INSTRUMENTED INDENTATION FOR METALLIC MATERIALS.*

AUTHORS:

Manuel David Espinel Fernández

Wilver Yamid Obregón Cristiano**

KEYWORDS: Instrumented indentation, fatigue, low cycles, hysteresis. hardness.

DESCRIPTION: In this study the fatigue curve is compared in the low cycle zone constructed by a conventional method and find a relationship with the loading and unloading test in instrumented indentation for a steel SAE 1045 and aluminum 6063. The tension-compression tests are carried out on the MTS Bionix® universal machine applying the ASTM E606 norm with a fixed deformation for each test using cylindrical specimens manufactured under the ASTM E8 norm. The instrumented indentation tests are conducted with the ASTM-E384-17 norm in the Bruker UMT Tribolab indentation machine, the test pieces used are coin-shaped cuttings thereof used in the plastic fatigue test and assembled in a polymer. The data obtained from the tension-compression test are represented in the $S-N_f$ curve and the loading versus the deformation curve called hysteresis, the load versus deformation curve is obtained from the instrumented indentation test with which it is possible through relationships known calculate some mechanical properties. From these results it is possible compare the load curves against the deformation of both and find a correction constant of the energy absorbed when the material is deformed, with this an equivalence of the deformations was found and the deformation is related to the load and the number of cycles yields a load curve versus number of cycles for the indentation method. Finally, the fatigue graphs are compared, for aluminum the behavior was quite similar and for steel the curve was a bit more distant but with an equal pattern, this may be because it was in a largest cycles area where there is greatest dispersion of points.

* Bachelor thesis.

** Faculty of Physico-Mechanical Engineering, School of Mechanical Engineering. Advisor: Dr. David Alberto Pertuz Comas, PhD, Mechanical Engineer.

INTRODUCCIÓN

La fatiga de materiales es un problema que ha afectado a la industria desde hace tiempo, su causa son esfuerzos fluctuantes que generan fracturas y que de no ser detectadas pueden causar la ruptura del elemento, por esto es necesario estudiar este fenómeno para poder diseñar basándose en modelos matemáticos que ayuden a predecir cuándo será el fallo y lograr actuar antes, esto hace que sea imperioso el avance en los métodos utilizados para analizarla por lo cual la indentación instrumentada es una excelente alternativa que puede convertir en un proceso más óptimo el estudio de esta.

Para determinar la resistencia de un material sometido a cargas de fatiga existen diferentes tipos de ensayo, el dispositivo más usado es la máquina de flexión rotativa de alta velocidad de R.R Moore, esta somete una probeta a cargas de flexión por medio de pesas. También existen otras máquinas que pueden someter una muestra a diferentes tipos de cargas fluctuantes como tensión, compresión y torsión. En el estudio de fatiga en bajos ciclos la formulación de la vida del elemento se hace a partir de la amplitud de deformaciones (diagrama $\varepsilon - N_f$), esto debido a que en esta zona se produce una deformación elastoplástica por lo cual es más fácil mantenerla controlada a esta que a la tensión, mientras en la zona de altos ciclos se realiza la estimación de vida a partir de la amplitud de las tensiones (diagrama $S - N_f$).¹

El uso dinámico de la indentación instrumentada para analizar la fatiga en materiales ferrosos y no ferrosos es poco habitual, por esto, experimentalmente no hay registros suficientes para saber que sección de la curva ($S - N_f$ y/o $\varepsilon - N_f$) puede ser elaborada por este método. La caracterización de un material por un método convencional como tensión-compresión en una máquina de ensayo universal

¹ BADIOLA, V. Cargas variables, 2004. pp. 55–79.

requiere de un número alto de muestras, para el caso de fatiga en bajos ciclos la norma ASTM E-606 define un número mínimo de 10 probetas las cuales se deben construir con un acabado a espejo para que no se presenten ralladuras en planos perpendiculares, pero otros autores como Escacena² considera necesarias 50 pruebas para investigación y desarrollo, no obstante estas pruebas no tienen en cuenta factores como recubrimientos superficiales y puede llegar a ser difícil hacer ensayos en metales como oro o materiales utilizados en la industria petrolera (tubing) por sus elevados costos y por la dificultad de construir las probetas. Como ejemplo, si se desea conocer el comportamiento a fatiga de un material hasta 10^8 ciclos y teniendo una maquina capaz de producir 5000 ciclos por minuto, llevaría catorce días realizar un ensayo, este método puede obtener resultados con una elevada dispersión, esto se les atribuye a circunstancias como mala alineación de la probeta, vibraciones externas, errores en las medidas de esfuerzo, entre otros, aunque la dispersión de resultados en los ensayos es una propiedad del fenómeno físico.³

La indentación instrumentada se ha implementado para la búsqueda de nuevas técnicas que permiten obtener propiedades y fenómenos presentes en los materiales, por un proceso conocido como, carga y descarga, consiste en indentar el material en repetidas ocasiones en el mismo punto, mientras se registra la carga aplicada y la profundidad correspondientes a cada ciclo. Se obtiene un punto de la curva Tensión vs Deformación, en la región plástica. Con estos puntos es posible determinar el Coeficiente de Resistencia y el Exponente de endurecimiento por deformación.⁴ ⁵ Se han realizado estudios donde se analizan materiales por indentación instrumentada bajo cargas cíclicas, enfatizando el comportamiento de

² ESCACENA, J. Caracterización de las Propiedades Mecánicas del Aluminio 7075-T651, pp. 9–23.

³ AVILÉS, Rafael. Análisis de Fatiga en Máquinas, 2005, pp. 199–207.

⁴ MEZA, Juan, et al. Using the ultrasound and instrumented indentation techniques to measure the elastic modulus of engineering materials," Rev. Met., vol. 44, 2008 no. 70, pp. 52–65.

⁵ PERTUZ, Alberto. La indentación aplicada a la caracterización estática y dinámica de materiales, pp 1-8.

propagación de la profundidad de la indentación como la influencia de la sobrecarga y la subcarga.

En 1987 Banerjee⁶ realizó estudios para determinar las propiedades dinámicas a diferentes vidrios, el procedimiento consistió en aplicar varios ciclos de carga constante hasta lograr observar la aparición de una grieta, esto se realizó para varios valores de fuerza construyendo así la curva de fatiga, él concluyó la falla del elemento ocurría cuando se generaba la nucleación de una grieta, no obstante cabe aclarar que el comportamiento entre cerámicos y metales es muy diferente por lo cual, Banerjee no recomienda este método para materiales metálicos.

Otros experimentos realizados por Xu mostraron fenómenos que implican algunas similitudes en el comportamiento de la propagación de la profundidad de la fatiga por indentación y la propagación convencional de grietas por fatiga, al finalizar estos experimentos Xu concluyó que “Los resultados muestran que el comportamiento de la propagación de profundidad de indentación bajo condiciones de carga de fatiga cíclica es similar al de la propagación de grietas por fatiga, aunque no hay grietas en los materiales con muescas por adelantado. El estudio arroja luz sobre la posibilidad de construir una relación entre las pruebas de fatiga convencionales y las pruebas de fatiga por indentación”.⁷

El presente trabajo se basa en investigar el fenómeno de fatiga por un método convencional y el fenómeno de fatiga por indentación instrumentada, así mismo el objetivo principal es analizar si hay una relación existente e intentar establecer un modelo que relacione la curva universal de fatiga convencional y la posible curva obtenida por el método de indentación instrumentada para un acero AISI 1045 y un aluminio 6360 para la zona de bajos ciclo

⁶ BANERJEE, B. R. Study of Glass Dynamics Propieties,” J. of American Ceramic Society, 1987. no. Vol, p. 10.

⁷ XU, Baoxing. Xu; YUE, Zhufeng; WANG, J. Indentation fatigue behaviour of polycrystalline copper, Mech. Mater, 2007, vol. 39, no. 12, pp. 1066–1080.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar la relación entre la curva universal de fatiga convencional y aquella obtenida por el método de indentación instrumentada para materiales metálicos.

1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

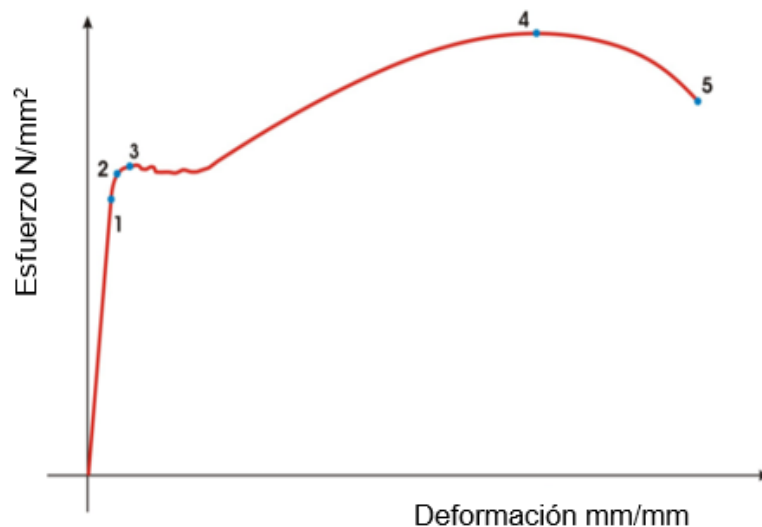
- Investigar el fenómeno de fatiga convencional y el fenómeno de fatiga por indentación instrumentada.
- Construir la curva de fatiga en la zona de ciclos bajos (fatiga plástica) para un acero SAE 1045 y un aluminio 6063 (estado T5) por el método tradicional.
- Analizar el método de fatiga por indentación instrumentada en la zona de ciclos bajos para un acero SAE 1045 y un aluminio 6063 (estado T5).
- Comparar la relación y establecer un modelo entre la curva tradicional y la curva por indentación instrumentada.
- Establecer la relación estructura propiedad.

2. MARCO TEORICO

2.1. ENSAYO DE TRACCIÓN

Un ensayo de tracción consiste en someter una muestra conocida como probeta a esfuerzos axiales con el fin de observar el comportamiento de la deformación respecto a la carga, esto da una idea de cómo sería la conducta del material en condiciones reales y permite realizar cálculos previos en situaciones de diseño de elementos mecánicos. Este ensayo es altamente usado en la caracterización de materiales metálicos, de allí es posible obtener datos como tenacidad, módulo de elasticidad, resistencia ultima a la tracción y modulo a la fragilidad, en la figura 1 se puede observar el comportamiento a la tracción de un acero.^{8 9}

Figura 1. Curva esfuerzo versus deformación para un acero.



Fuente: F. P. Reglada, "DISEÑO DE CONSTRUCCIONES METÁLICAS," CFGS Constr. Met.

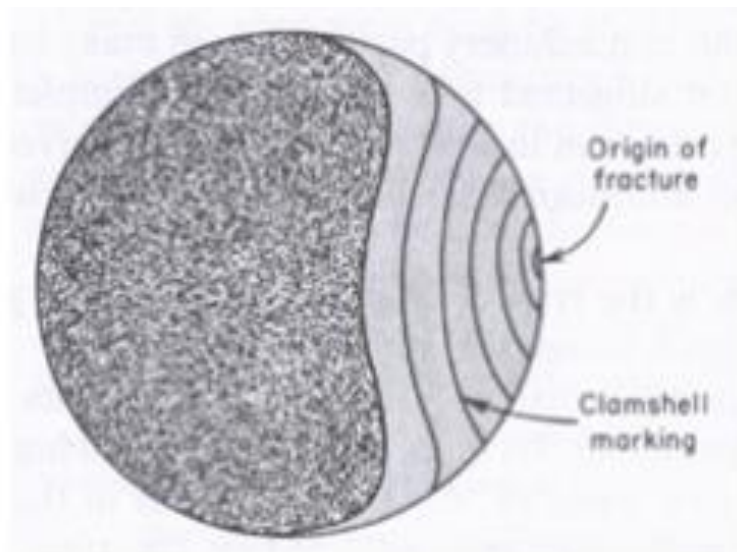
⁸ JIMÉNEZ, Julián. Tracción de probetas metálicas, no. Septiembre, 2018.

⁹ FORMACION PROFESIONAL REGLADA, Diseño de construcciones metálicas, CFGS Constr. Met.

2.2. FATIGA

La fatiga se define como el fenómeno por el cual un material falla al estar sometido bajo cargas cíclicas, debido a deformaciones plásticas de la estructura del material; durante la falla el material genera una grieta, lo cual conlleva a la fractura si está en las mismas condiciones. Wöhler hacia el año 1920 descubrió que el 90% de las piezas fallan debido a la fatiga, presento unos límites a los esfuerzos de diseño en las que una pieza no falla dependiendo del número de ciclos. Wöhler observo que se podían distinguir dos zonas en las caras de rotura (figura 2), una zona suave con líneas asociadas a diferentes frentes de grieta y una zona rugosa asociada a la rotura final.^{10 11 12}

Figura 2. Superficie de fractura de un material sometido a fatiga.



Fuente: D. CALLISTER, William. *“Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales,”* in Reverté, 1995

¹⁰ ESCACENA, J. Caracterización de las Propiedades Mecánicas del Aluminio 7075-T651, pp. 9–23.

¹¹ XU, Baoxing. Xu; YUE, Zhufeng; WANG, J. Indentation fatigue behaviour of polycrystalline copper, Mech. Mater, 2007, vol. 39, no. 12, pp. 1066–1080.

¹² ORTIZ, J. Comportamiento Mecánico del acero 35NCD16 Sometido a Ensayos de Fatiga a Bajo Ciclo, Universidad Industrial De Santander, 2013.

El estudio de la fatiga en los metales se suele dividir en tres categorías:¹³

- a) Fatiga de gran número de ciclos. Este tipo de fatiga aparece cuando las tensiones nominales responsables de la fatiga son muy pequeñas (en relación con el límite elástico del material).
- b) Fatiga de bajo número de ciclos. Esta fatiga ocurre cuando la deformación plástica en cada ciclo es visible.
- c) Fatiga térmica. Debido a las tensiones que aparecen en los ciclos térmicos.

2.2.1. Fases de la fatiga. La fatiga tiene un proceso desde que se forma la grieta hasta que falle el material, el fallo final se produce cuando la unión de varias grietas pequeñas alcanza un tamaño crítico o una de estas grietas se hace dominante. La fatiga se puede producir por defectos o discontinuidades del material, tales defectos como marcas superficiales, inclusiones, poros, puntos triples de intersección de bordes de grano, etc., provocan una concentración local de esfuerzos que potencian la aparición de las grietas.¹⁴

La fatiga falla generalmente en tres fases:^{15 16}

- Fase 1: Se presenta una o más grietas en la superficie del material. Estas grietas pueden aparecer en cualquier lugar, pero ocurren con más frecuencia cerca de un concentrador de esfuerzos y en la superficie exterior donde las fluctuaciones son elevadas.
- Fase 2: La grieta crece y se propaga por efecto de las cargas. Las grietas generalmente son finas y de difícil detección, aun cuando se encuentren próximas a producir la rotura de la pieza.

¹³ VALLELLANO, Martin. Crecimiento de grietas pequeñas por fatiga en componentes con concentradores de tensión, Universidad de Sevilla, 1998.

¹⁴ *Ibid.*,

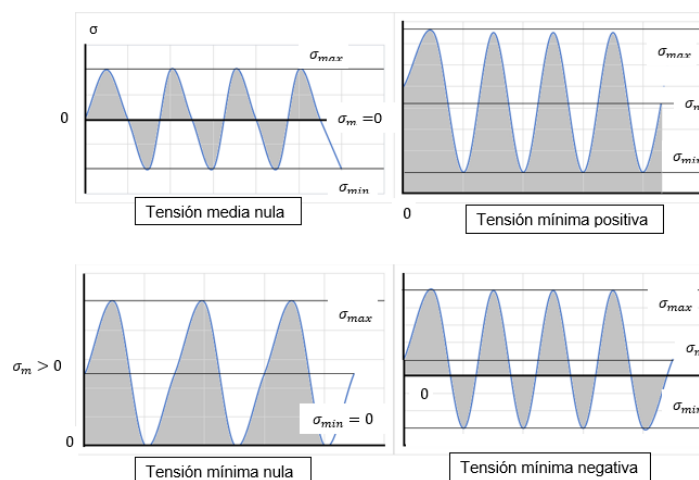
¹⁵ ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA JULIO GARAVITO, fatiga protocolo Curso de Materiales, 2008.

¹⁶ CALLISTER, William. Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales in Reverté, 1995, pp. 114–146.

- Fase 3: Se fractura la pieza, la sección transversal del material se reduce por separación de las partículas en el plano de la fisura, la sección neta de la pieza es incapaz de continuar resistiendo la carga desde un punto de vista estático produciéndose la rotura por fatiga.

2.2.2. Ensayo de fatiga, curva S-N_F. A mediados del siglo XIX se implementó un sistema para analizar el tiempo de operación de un componente hasta que falle conocido como vida a fatiga o curva S-N, tal sistema consistía en un ensayo que reproducía una situación similar a lo que estaría sometido el material. Para hacer estos ensayos se construyeron maquinas como la de flexión rotativa la cual se pone a rotar una probeta, esta se flexionaba por una fuerza externa y se originaban cargas de tracción y compresión, por otra parte, está la maquina hidráulica que genera tensiones de tracción y compresión repetitivas de manera axial. Los ensayos sometían la probeta a tensiones cíclicas con una amplitud máxima (σ_{max}), que variaba para poder registrar diferentes resultados, pero el ensayo también dependía de la componente estática (σ_m), esto había sido observado por Wöhler y la componente estática puede variar (figura 3).^{17 18}

Figura 3. Esfuerzos de fatiga con tensiones variables cíclicamente.



¹⁷ *Ibid.*,

¹⁸ AVILÉS, Rafael. Análisis de Fatiga en Máquinas, 2005, pp. 199–207.

$$\sigma_a = \frac{(\sigma_{max} - \sigma_{min})}{2} \quad (1)$$

Donde:

σ_a : Esfuerzo alternante.

σ_{max} : Esfuerzo máximo.

σ_{min} : Esfuerzo mínimo.

La mayoría de los ensayos se realizan con tensión media nula es decir $+\sigma_{max}$ y σ_{min} ($-\sigma_{max}$), además se definen otros dos parámetros conocidos como coeficiente de asimetría de la carga (R) y amplitud (A).¹⁹

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (2)$$

$$A = \frac{\sigma_{max} - \sigma_m}{\sigma_m} \quad (3)$$

Para caracterizar el material se deben realizar varios ensayos para determinar la banda de fractura con suficiente precisión, ya que el material no cuenta con homogeneidad en las características microestructurales incluso si es tratado de igual manera debido a esto la grieta puede variar dando lugar a resultados con dispersión. Si el número de ciclos es más alto se deberá realizar más pruebas por punto y con la ayuda de un método estadístico para encontrar la media.^{20 21}

¹⁹ ESCACENA, J. Caracterización de las Propiedades Mecánicas del Aluminio 7075-T651, pp. 9–23.

²⁰ *Ibid.*,

²¹ AVILÉS, Rafael. Análisis de Fatiga en Máquinas, 2005, pp. 199–207.

2.2.3. Fatiga en bajos ciclos. En ocasiones las fallas por fatiga ocurren en esfuerzos altos y en ciclos de operación bajos, de esto se dio la expresión “fatiga en bajos ciclos” que comprende un rango hasta $10^3 - 10^4$. La fatiga en bajos ciclos se encuentra controlada por deformación y no por tensión, la pieza bajo estas condiciones experimenta cierto grado de constricción estructural en la región de los concentradores de esfuerzos.²²

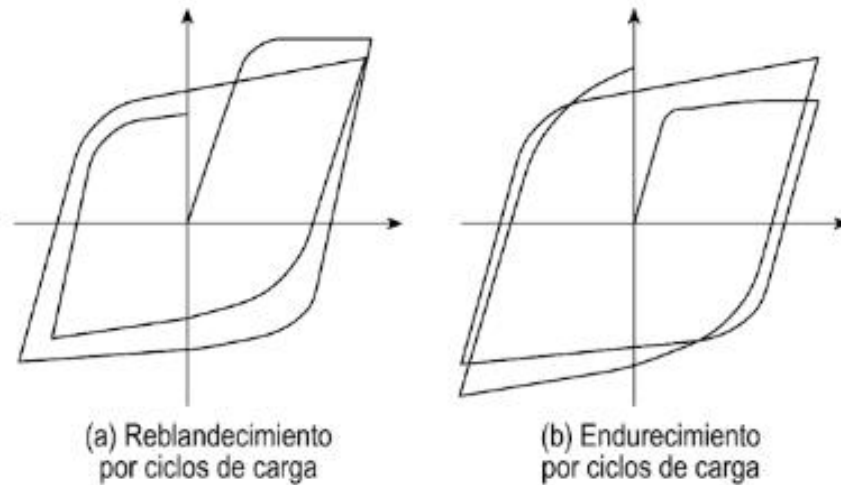
Para el año 1960 se realizó un estudio de la rotura de una pieza trabajando a bajos ciclos donde se descubrió que esto se debe al aumento de deformación plástica, para este caso se realizan ensayos con control de desplazamiento. Este ensayo consiste en someter una probeta a tensión-compresión donde alcanza una fase transitoria en la que la deformación plástica crece y se logra un régimen permanente en el que se aprecia una respuesta con histéresis. La histéresis produce una elevación de temperatura, pero en la mayoría de los metales este calor generado se distribuye por la pieza debido a sus características de conductividad térmica y no produce efectos significativos en sus propiedades. En el periodo inicial se puede observar si el material se reblandece o se endurece dependiendo si al finalizar el primer ciclo este pasa por encima o por debajo de la curva de carga (figura 4).^{23 24}

²² UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES. Introducción a la fatiga, 2015.

²³ VALLELLANO, Martín. Crecimiento de grietas pequeñas por fatiga en componentes con concentradores de tensión, Universidad de Sevilla, 1998.

²⁴ AVILÉS, Rafael. Análisis de Fatiga en Máquinas, 2005, pp. 199–207.

Figura 4. Ciclo de histéresis a) Reblandecimiento por ciclos de carga b) Endurecimiento por ciclos de carga.



Fuente: R. Avilés, “Análisis de Fatiga en Máquinas,” 2005.

La curva de Coffin y Manson combina dos rectas, una para el régimen elástico (ciclos altos) y otra para el plástico (ciclos bajos), es un estudio basado en deformaciones. La construcción de la curva se basa en el uso de una ecuación que consta de algunas propiedades del material, esta ecuación describe una relación entre vida de la pieza y la deformación.²⁵

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \underbrace{\frac{\sigma_f'}{E}(2N)^b}_{\text{Zona elástica}} + \underbrace{\varepsilon_f'(2N)^c}_{\text{Zona plástica}} \quad (4)$$

Donde:

σ_f' : Coeficiente de resistencia a fatiga.

ε_f' : Coeficiente de ductilidad fatiga.

b: Varía entre -0.05 y -0.012.

c: Depende de las propiedades del material.

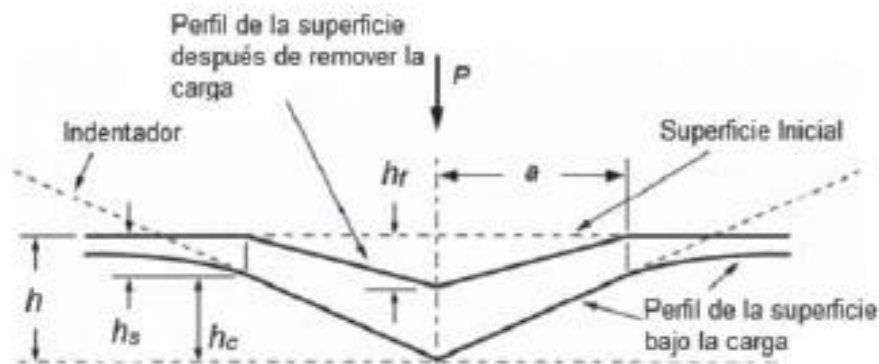
²⁵ *Ibid.*,

2.3. INDENTACIÓN

La indentación es un método que se desarrolló por Brinell hacia el año 1900, consiste en presionar sobre una superficie con un indentador dejando una hendidura o impresión sobre la superficie del material (Figura 5). A partir de esta hendidura y de la carga aplicada se puede obtener el valor de la dureza de un material.²⁶

La dureza es una propiedad mecánica de la superficie del material relacionada con las características elásticas y plásticas, existen diferentes definiciones de dureza dependiendo del método que se utiliza para encontrar su valor, existen diferentes tipos de indentadores, como Vickers, Knoop y Brinell.²⁷

Figura 5. Sección transversal del perfil de una superficie durante y después de la indentación.



Fuente: J. M. Meza, C. Chaves, and J. M. Vélez, "Técnicas de indentación: medición de propiedades mecánicas en cerámicas," *Dyna*, 2005.

²⁶ MEZA, Juan; CHAVES, Cesar; VÉLEZ, Juan. Técnicas de indentación: medición de propiedades mecánicas en cerámicas, *Dyna*, no. 149, 2005, pp. 81–93.

²⁷ ORTEA, Enrique. Ensayos de dureza," *Ceram. Int*, 2010, pp. 1–8.

2.3.1. Modelo de Tabor. Continuando por la línea de relacionar la indentación como método para determinar las propiedades mecánicas de los materiales, Tabor sugirió que la dureza se puede relacionar directamente con el esfuerzo último de los materiales, relación válida para materiales blandos donde el endurecimiento por deformación es despreciable. Luego de otros estudios realizados por Tabor este logro extender la ecuación a materiales que sufren endurecimiento (ecuación 5).²⁸

$$\sigma_U * c_i = H_B \quad (5)$$

Donde:

σ_U : Resistencia a la tracción ultima [kg/mm^2].

H_B : Dureza Brinell.

c_i : Constante que depende únicamente del indentador establecida de valor 2,8.

La constante ha sido motivo de discusión en investigaciones posteriores debido a que no se tiene en cuenta el cambio de las propiedades del material, no obstante un análisis sistemático de la ecuación de Tabor realizado (Bermúdez, Rafael 2005)[18] mediante simulación por elementos finitos, para un gran número de materiales que presentan endurecimiento por deformación, han dado como resultado, y un factor c de 2,8.²⁹

Para el cálculo de la dureza Brinell se utiliza la ecuación de dureza Vickers (ecuación 6), donde a partir de los datos de carga máxima y profundidad de contacto (figura 5) podemos obtener este valor, teniendo la dureza Vickers con la ayuda de una tabla de conversiones obtenemos la dureza Brinell.

²⁸ TABOR, D. The Hardness of Metals. Clarendon Press. Oxford, 1951.

²⁹ BERMUDEZ JIMENEZ, R. Modelo físico de plastilina para el estudio del modo de deformación de materiales bajo indentación, 2011.

$$Hv = \frac{P_{\max}}{24.5 \cdot h_c^2} \quad (6)$$

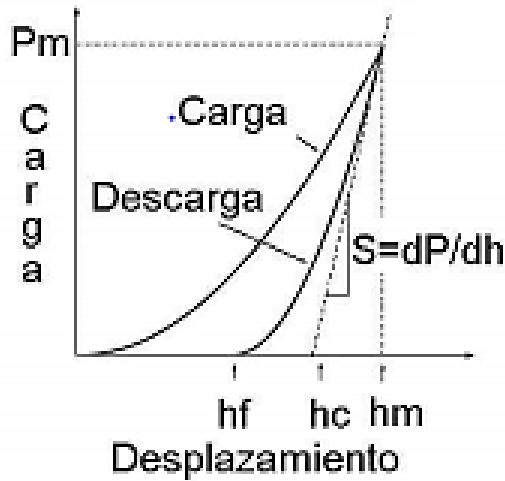
2.4. INDENTACIÓN INSTRUMENTADA

La indentación instrumentada a diferencia de los probadores de dureza tradicionales permiten la aplicación de una fuerza y/o desplazamientos de manera específica, estos pueden oscilar entre 1µN y 100 N, la resolución de estos equipos es de unos 0.2 µN en la carga y 2 nm en los desplazamientos, de tal forma que es posible llevar un control y registro de estos durante cada ciclo, es un método que puede ser utilizado para obtener algunas propiedades mecánicas de materiales como metales, cerámicos y biopolímeros. Consiste en la aplicación de carga y descarga en repetidas ocasiones, en el mismo punto, también es conocida como nanoindentación o indentación de profundización. Los primeros trabajos se realizaron de manera sistemática hacia finales de los años 70 (Frohlich et al 1977) y durante inicios de la década de los ochenta (Newey 1982, Pethica et al 1983, Loubet et al 1986), en 1986 Doerner y Nix realizaron una investigación y trabajo más fácil de comprender y posteriormente en 1992 Oliver y Pharr lo complementó y mejoró, hasta hoy es el método usado para interpretar los datos de nanoindentación.^{30 31}

³⁰ MEZA, Juan; CHAVES, Cesar; VÉLEZ, Juan. Técnicas de indentación: medición de propiedades mecánicas en cerámicas, Dyna, no. 149, 2005, pp. 81–93.

³¹ VANLANDINGHAM, M. Review of instrumented indentation, J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol., vol. 108, 2003, no. 4, p. 249.

Figura 6. Curva de carga vs Desplazamiento producida durante el contacto.



Fuente: J. M. Meza, C. Chaves, and J. M. Vélez, "Técnicas de indentación: medición de propiedades mecánicas en cerámicas," *Dyna*, 2005.

Donde:

Pm: Corresponde a la carga máxima

hm: Penetración máxima

hf: Profundidad final de la huella o profundidad residual.

S: Tangente a la curva de descarga (rigidez)

hc: Profundidad de contacto lograda durante la aplicación de la carga máxima

Los ensayos de indentación instrumentada se desarrollaron para evitar el cálculo del área de contacto debido a la dificultad que representa, por medio de la nanoindentación esta puede ser inferida a partir de los datos de carga, desplazamiento y tipo de indentador usado. A partir de lo dicho anteriormente el cálculo del área de contacto con un indentador Vickers se calcula como:

$$A_c = 24.5 * h_c^2 \quad (7)$$

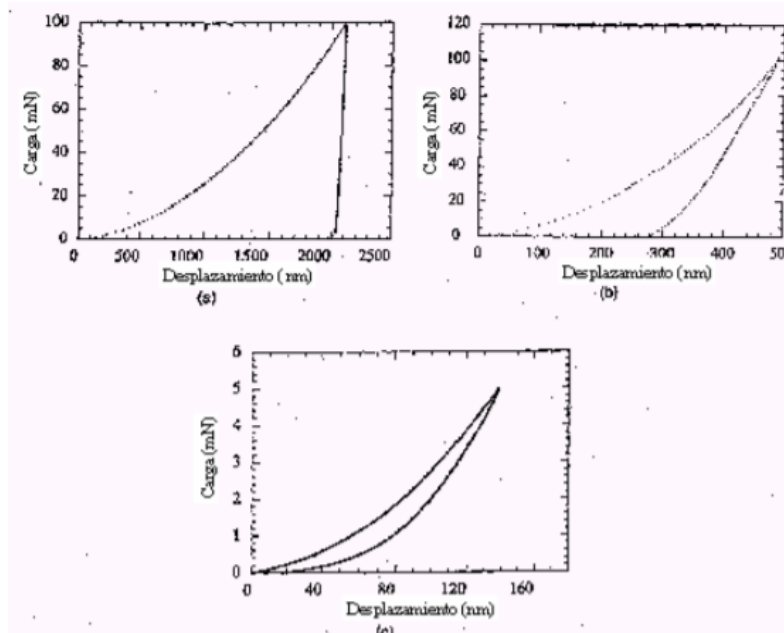
$$h_c = h_m - 0.75 * \frac{P_m}{S} \quad (8)$$

Donde:

Ac: Área de contacto

Ahora bien, un ensayo de indentación instrumentada nos proporciona curvas características de carga frente a desplazamiento, p-h (figura 6). Esta grafica nos muestra dos partes una de carga y otra de descarga. durante la segunda parte (descarga) se pueden producir diferentes respuestas como se observa en la figura 7.

Figura 7. Curvas de carga-desplazamiento con comportamiento: a) plástico, b) elastoplástico, c) elástico.



Fuente: R. Bermudez Jimenez, “Modelo físico de plastilina para el estudio del modo de deformación de materiales bajo indentación”. 2011.

2.5. MICROESTRUCTURA DE LOS MATERIALES

La microestructura es un factor buscado con la necesidad de relacionar esto con las propiedades mecánicas y químicas de los sólidos, esto básicamente es el resultado de la forma en que se lleva el material desde su forma líquida hasta el estado sólido, estos detalles estructurales pueden estar en un rango interatómico de 0 a 3 nanómetros. Los constituyentes metálicos que pueden estar presentes en los aceros son: ferrita, cementita, perlita, sorbita, troostita, martensita, bainita y algunas veces austenita, estos dependen de factores como el porcentaje de carbono, el método y tiempo de enfriamiento del material entre otros factores además pueden variarse por medio de tratamientos térmicos y/o químicos, afectando así la microestructura y las propiedades mecánicas.³²

En las aleaciones de aluminio es común encontrar la aleación con elementos como el silicio y el magnesio, las cuales producen la formación del compuesto Inter metálico Mg_2Si , estas incrustaciones dentro de la red cristalina del aluminio hacen que este mejore sus propiedades mecánicas como maquinabilidad y resistencia, se pueden ver en la microestructura en un tono más oscuro y con forma de líneas (estado β) o hexágonos (estado β').³³

³² FEDERACIÓN DE ENSEÑANZA DE CC.OO. DE ANDALUCIA, Metalografía Introducción, 2011, pp. 1–14.

³³ TORRES, Edwar; ARBELAEZ, Juan. Caracterización de aleación de aluminio aa6063-t5 mediante microscopía óptica, electrónica de barrido y electrónica de transmisión, Rev. Colomb. Mater., pp. 59–64.

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1. MATERIALES METÁLICOS

Para este estudio los materiales usados son: acero SAE 1045 y aluminio 6063 T5, a continuación, se puede ver la descripción de estos materiales.

3.1.1. Acero SAE 1045. El acero usado para este estudio es un SAE 1045, utilizado ampliamente en ingeniería en aplicaciones como fabricación de componentes de maquinaria con exigencias moderadas tales como ejes, engranajes, tornillos, cuñas, y herramientas agrícolas. Ofrece un nivel medio de resistencia mecánica y tenacidad a bajo costo, tiene buenas características de forja, maquinabilidad y responde al endurecimiento térmico por llama o inducción. La composición química de este acero se presenta en la tabla 1. En la tabla 2 se observan algunas de las propiedades mecánicas que tiene este material las cuales son tomadas de catálogo.

Tabla No. 1 Composición química del acero SAE 1045.

COMPOSICION QUIMICA	C %	Mn %	P max %	S max %	Si max %
Análisis típico en %	0.43-0.50	0.6-0.9	0.04	0.05	0.2-0.4

Fuente: SAE 1020 y SAE 1045 Aceros ingeniería al carbono, Cia. General de Aceros S.A.

Tabla No. 2 Propiedades mecánicas del acero SAE 1045.

Resistencia a la tracción [MPa]	Límite de fluencia [MPa]	Elongación %	Reducción de área [%]	Dureza HB
655	413	23	44	170-190

Fuente: SAE 1020 y SAE 1045 Aceros ingeniería al carbono, Cia. General de Aceros S.A.

3.1.2. Aluminio 6063 T5. El aluminio usado para este estudio es el aluminio 6063 en estado T5, es uno de los más usados debido a que tiene buenas propiedades como: buena maquinabilidad, soldabilidad y de fácil formado, sus aplicaciones más comunes son perfiles de arquitectura, puertas, enrejados, estructuras, tubos de riego, disipadores de calor y elementos especiales para maquinaria. La composición química de este aluminio se presenta en la tabla 3. En la tabla 4 se observan algunas de las propiedades mecánicas que tiene este material las cuales son tomadas de catálogo.

Tabla No. 3 Composición química del aluminio 6063.

COMPOSICION QUIMICA	Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Cr %	Zn %	Ti %
Análisis típico en %	0.3- 0.6	0.1- 0.3	0.1	0.3	0.4- 0.6	0.05	0.15	0.2

Fuente: Propiedades del aluminio en aleación 6063, ALACER MAS.

Tabla No. 4 Propiedades mecánicas del aluminio 6063 T5.

Resistencia a la tracción [MPa]	Límite de fluencia [MPa]	Elongación %	Límite de fatiga [%]	Dureza HB
220	150	14	150	65

Fuente: Propiedades del aluminio en aleación 6063, ALACER MAS.

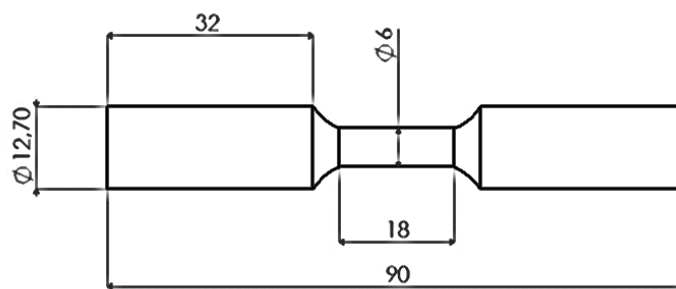
3.2. ENSAYO DE TRACCIÓN

El ensayo de tracción se llevó a cabo bajo la norma ASTM A370³⁴ la cual indica las dimensiones de la probeta y las condiciones adecuadas para la prueba, para iniciar se realiza la medición y revisión respectiva de las muestras, se hace el montaje en la máquina y se introduce la velocidad de deformación, las condiciones ambientales fueron las de laboratorio en el momento. La máquina proporciona datos de fuerza, deformación y tiempo transcurrido en el ensayo.

3.3. ENSAYO DE FATIGA POR METODO TRADICIONAL

3.3.1. Descripción de las probetas. El suministro del material es adquirido en forma de varillas para el caso del aluminio consta de un diámetro de 12,7 milímetros y para el acero de 14 milímetros, posteriormente se realiza un maquinado en CNC, donde las medidas usadas son las recomendadas por la norma ASTM E835. En la figura 8 se observan las medidas para las probetas de acero y en la figura 9 se observan para el aluminio. El número de probetas existentes total para los ensayos fue de 30 de las cuales la mitad son de un material y las demás del otro.

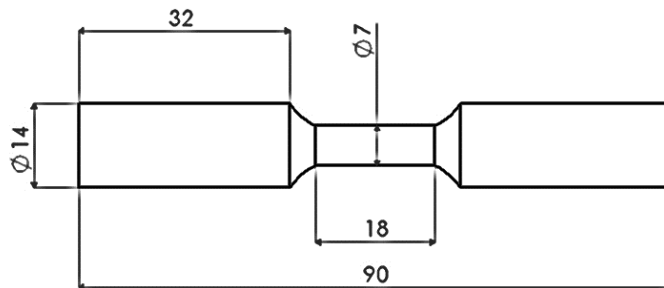
Figura 8. Medidas probetas acero SAE 1045 en milímetros.



³⁴ AMERICAN NATIONAL STANDARD. ASTM A370:12 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products 1", 2012. pp. 1–48.

³⁵ AMERICAN NATIONAL STANDARD. ASTM E8/E8M–16a Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials1", 2012. pp. 1–30.

Figura 9. Medidas probetas aluminio 6063 en milímetros.



3.3.2. Recepción y medición de las probetas. Inicialmente se realiza una inspección visual para verificar la condición de estas y posteriormente se hace la toma de las dimensiones, la longitud total, la de sección reducida y el diámetro menor y mayor, se corrobora que están dentro de las especificaciones dadas por la norma ASTM E8³⁶. Cabe resaltar que las probetas no constan de un buen acabado superficial a causa del proceso de maquinado, debido a esto se realiza un proceso de pulido manual el cual consiste en ubicar las probetas en un torno industrial trabajando a 520 rpm y utilizando lijas N° 320, 600 y 1000, esto con el fin de conseguir un acabado superficial pulido al espejo.

3.3.3. Procedimiento del ensayo de fatiga. La norma ASTM E606³⁷ recomienda que los valores de esfuerzo máximo o mínimo para la prueba de estén entre 90% y 70% del esfuerzo último (S_u), para así asegurar que el ensayo este en la zona de ciclos bajos.

³⁶ *Ibid.*,

³⁷ AMERICAN NATIONAL STANDARD. ASTM E606/E606M-12 Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing”, 2012. pp. 1–16.

3.3.3.1. Prueba de fatiga controlada por deformación axial. Este ensayo se realiza siguiendo la norma ASTM-E606³⁸ recomendada para ciclos bajos en fatiga. Para el ensayo de fatiga controlado por deformación axial se utiliza la máquina universal de ensayos MTS Bionix® Servohydraulic Test Systems Model 370.02 de capacidad 25 KN (figura 10).

Figura 10. Máquina universal de ensayos MTS Bionix® Servohydraulic Test Systems Model 370.02.



Inicialmente se realiza el montaje de la probeta en la maquina universal de ensayos donde sea la selección del agarre adecuado para estas y se verifica que esta tenga una buena alineación, la presión con la que se sujetaron fue de 500 psi.

Para dar inicio al ensayo se ingresan al sistema de control los datos de deformación máxima-mínima y demás (tabla 5), los cuales se obtienen del ensayo de tracción. Para la primera prueba de fatiga se utiliza la deformación hallada al 90% de σ_{Max} y seguido a esto, se usan valores cada vez menores asegurando que se encuentre en la zona de bajos ciclos.

³⁸ *Ibid.*,

Tabla No. 5 Deformación hallada al 90% de σ_{Max} .

	$\sigma_{Max} Traccion$ [MPa]	Fatiga $R = -1$ [MPa]		Deformación Nominal
		$0.9 * \sigma_{Max}$	$0.9 * \sigma_{Min}$	
Acero	670	610	-610	+ - 0.5
Aluminio	220	198	-198	+ - 0.42361

Tabla No. 6 Condiciones para el ensayo de fatiga.

Las condiciones para el ensayo	
Tipo de ensayo	Fatiga oligociclica (bajos ciclos)
Deformación total	1-2%
Relación de esfuerzos	$S_{max}/S_{min} = -1=R$
Velocidad de deformación	$1-5 \times 10^{-3} \text{ seg}^{-1}$
Frecuencia	2-10 Hz
Temperatura y humedad	Condición ambiente del laboratorio

Teniendo los datos establecidos se procede a realizar las 15 pruebas por cada material, el ensayo se ubicó en la zona de Tensión-Compresión, con una relación de desplazamiento axial de -1.

3.3.4. Construcción de la curva S vs N_f . La curva $S-N_f$ también llamada curva de Wohler se obtiene mediante la realización de varios ensayos donde se obtienen los valores de esfuerzo máximo, mínimo ($\sigma_{max}, \sigma_{min}$) y el número de ciclos hasta la rotura, este procedimiento se realiza para diferentes deformaciones en forma decreciente. Los datos se representan en un diagrama de esfuerzo versus el número de ciclos conocida como curva $S-N_f$. El esfuerzo es la mitad de la diferencia algebraica entre las cargas máximas, mínima (ecuación 1).

3.3.5. Construcción de la curva ϵ vs N_f . Con los resultados de las pruebas se procede a tomar los datos de numero de ciclos y deformación para remplazarlos en la ecuación 4 en zona plástica y mediante una regresión, obtener la constante c y el coeficiente de ductilidad a fatiga, por último, se construye la curva deformación versus número de ciclos.

3.4. ENSAYO DE INDENTACION INSTRUMENTADA

3.4.1. Descripción de las probetas. El material usado en la construcción de las las probetas para la prueba de indentación instrumentada se toma de las muestras de la prueba de fatiga por el método convencional, se realiza un corte de la probeta la cual tiene diámetro de 12,7 milímetros y 14 milímetros para el aluminio y el acero respectivamente, seguido a esto se realiza un cubrimiento de la probeta con un polímero de tal manera que solo queda expuesta la superficie plana y por último se realiza un pulido al espejo de la superficie de prueba. Para realizar el procedimiento las muestras pasan por una revisión de la superficie, se verifica que no tenga defectos o suciedad, se toman las dimensiones para verificar que las medidas sean las adecuadas para el montaje en la máquina.

3.4.2. Procedimiento del ensayo por Indentación instrumentada. Este ensayo se realiza tomando como guía la norma ASTM-E384-17³⁹ usada en métodos estándar para test de micro indentación. Para esta prueba se utiliza la máquina de Indentación Bruker UMT Tribolab (figura 11).

³⁹ AMERICAN NATIONAL STANDARD. ASTM E384-17 Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials", 2017. pp. 1–40.

Figura 11. Máquina de Indentación Bruker UMT Tribolab.



Para realizar el ensayo se usa un indentador Vickers con punta de diamante y se efectúa bajo carga controlada, la probeta se posiciona en la máquina y se ingresa la programación con los correspondientes datos de precarga, fuerza máxima, y número de ciclos. Debido a que en esta prueba no es posible saber el momento exacto en el que falla el material, se realizaron varios ensayos determinando como diez ciclos un número suficiente para obtener los datos requeridos para la investigación.

Tabla No. 7 Condiciones para el ensayo de indentación.

Las condiciones para el ensayo	
Tipo de ensayo	Indentación
Tipo de indentador	Vickers
Precarga	2 g
Fuerza máxima	70, 50, 30, 20, 10 [N]
Numero de ciclos	10
Temperatura y humedad	Condición ambiente del laboratorio

Cabe resaltar que con una sola probeta de diámetro de 12.7 milímetros para el acero y 14 milímetros para el aluminio es posible realizar todas las pruebas las cuales son 36 para cada material, los datos que se adquieren son los de carga, profundidad de penetración y numero de ciclos, esto se grafica carga versus profundidad.

3.5. PRUEBA METALOGRAFICA

Con las probetas de fatiga se realiza un corte longitudinal por cada material, luego se realiza un pulido manual con papel de lija con granulometrías diferentes, posteriormente se realiza un pulido sobre paño y lubricante para obtener un acabado al espejo. Para poder observar la microestructura del material se realiza un ataque químico con el reactivo Nital, donde se sumerge la probeta por varios periodos.

Por último, con la ayuda de un microscopio óptico se toman las micrografías al acero y aluminio. Este procedimiento está bajo la norma ASTM E3-01.⁴⁰

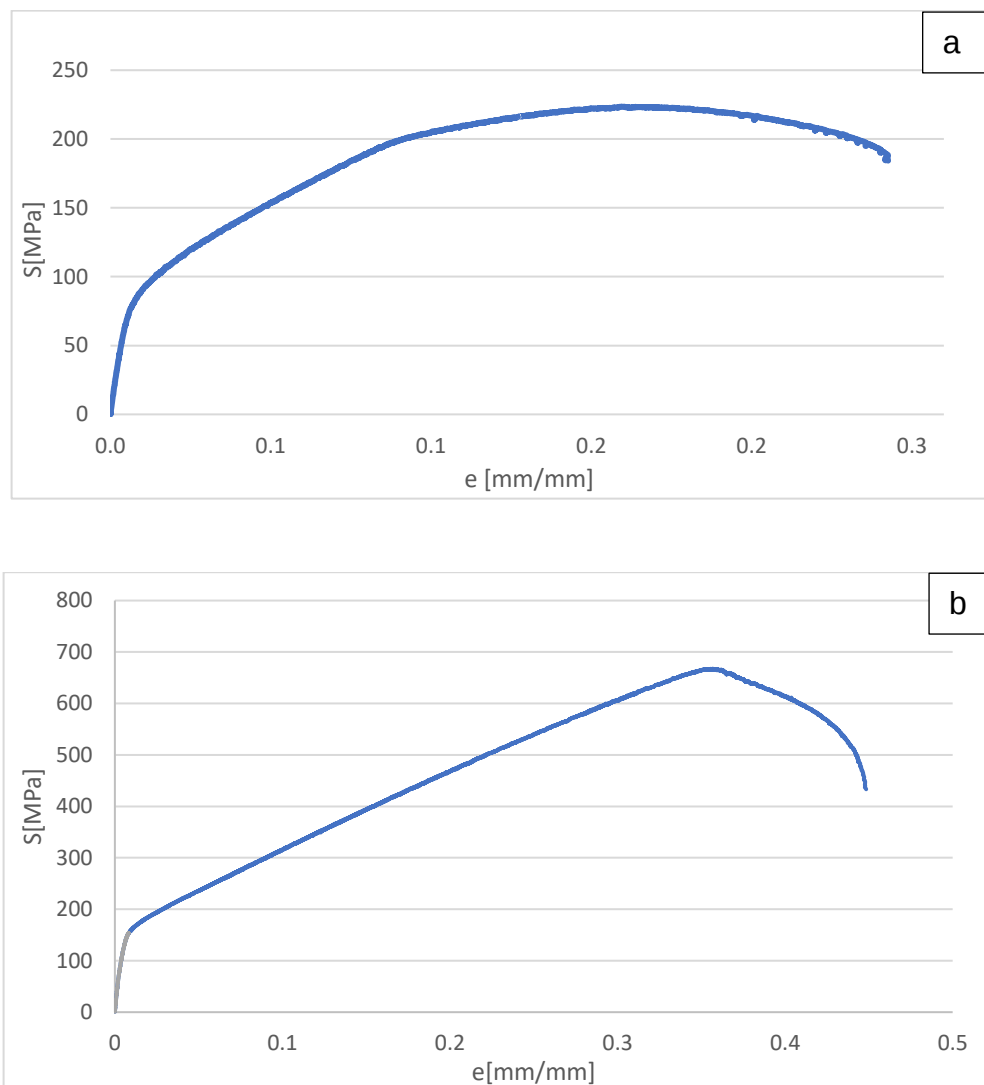
⁴⁰ AMERICAN NATIONAL STANDARD. ASTM E3-01e1 Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens", 2012. pp. 1–40.

4. RESULTADOS

4.1. RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN

Los datos que se obtienen del ensayo de tracción son: carga, deformación y tiempo transcurrido. En la figura 12 se tiene la representación gráfica del esfuerzo versus la deformación unitaria para ambos materiales, el esfuerzo es el cociente entre la carga y el área inicial de la sección reducida de las probetas y la deformación unitaria es la división entre la deformación real y la longitud inicial de la muestra.

Figura 12. Tracción, curva esfuerzo vs deformación, a) aluminio, b) acero.



En la tabla 8 se presenta los resultados del esfuerzo ultimo experimental y el cálculo del porcentaje de error respecto al nominal.

Tabla No. 8 Esfuerzo ultimo.

	Esfuerzo ultimo [MPa]	Esfuerzo ultimo nominal [MPa]	% error σ_u
Aluminio	222.3	220	1.03
Acero	670	655	2.24

A partir del esfuerzo ultimo obtenido del ensayo de tracción y la ecuación de tabor (ecuación 5) se obtiene la dureza HB para ambos materiales y por medio de una tabla de conversiones se halla la dureza HV, en la tabla 9 se tienen los valores encontrados y el porcentaje de error.

Tabla No. 9 Dureza experimental, dureza teórica y error encontrado.

	Esfuerzo ultimo [kg/mm²]	Dureza HV	Dureza nominal HV	% error HV
Aluminio	22.6	63	65	3.07
Acero	68.3	190	180	5.26

4.2. RESULTADOS DEL ENSAYO DE FATIGA POR EL MÉTODO CONVENCIONAL

Los datos que se obtienen del ensayo de Fatiga son: fuerza axial, desplazamiento y número de ciclos, a partir de esto se puede obtener la gráfica de carga-descarga e histéresis para un valor determinado de deformación. Teniendo los datos de las demás deformaciones (tabla 10) se obtiene la curva de fatiga del material. En la tabla 10 se encuentran los valores de deformación calculados.

Tabla No. 10 Deformaciones ensayos fatiga convencional.

	Deformación [mm]			
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4
Aluminio	+ - 0,4236	+ - 0,29075	+ - 0,27	+ - 0,235
Acero	+ - 0,5	+ - 0,351	+ - 0,3	+ - 0,281

4.2.1. Carga y descarga. En la figura 13 se puede observar la representación de los datos de fuerza vs ciclos, allí se puede ver como varia la carga a medida que avanza en el tiempo y el número de ciclos hasta el momento de la falla.

Figura 13. Fuerza vs ciclos del aluminio.



4.2.2. Histéresis. En la figura 14 y 15 se tiene la representación gráfica de los datos obtenidos en el ensayo de fatiga convencional, (fuerza vs deformación) para cada valor de deformación establecido (tabla 10).

Figura 14. Fuerza vs deformación aluminio, a) 82 ciclos, ± 0.4236 mm, b) 3501 ciclos, ± 0.235 mm.

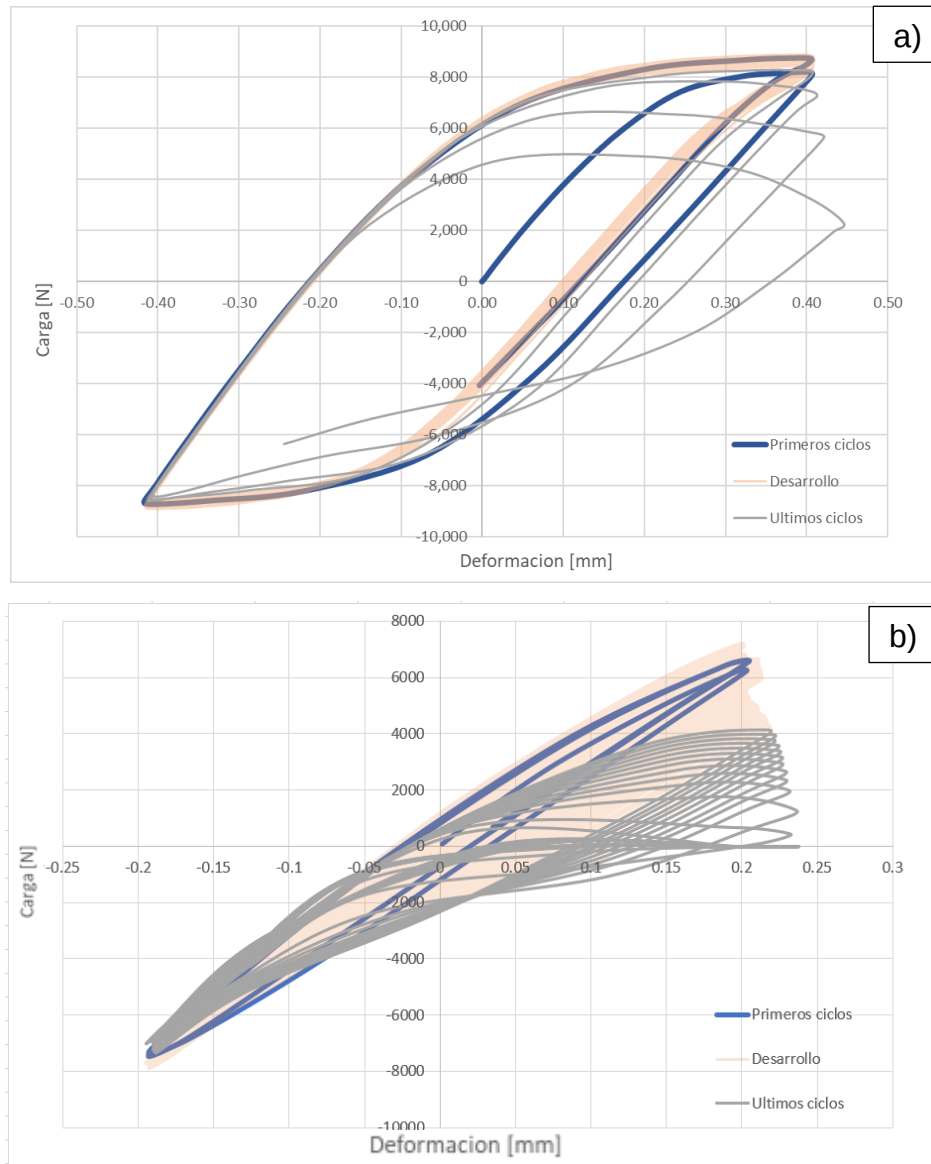
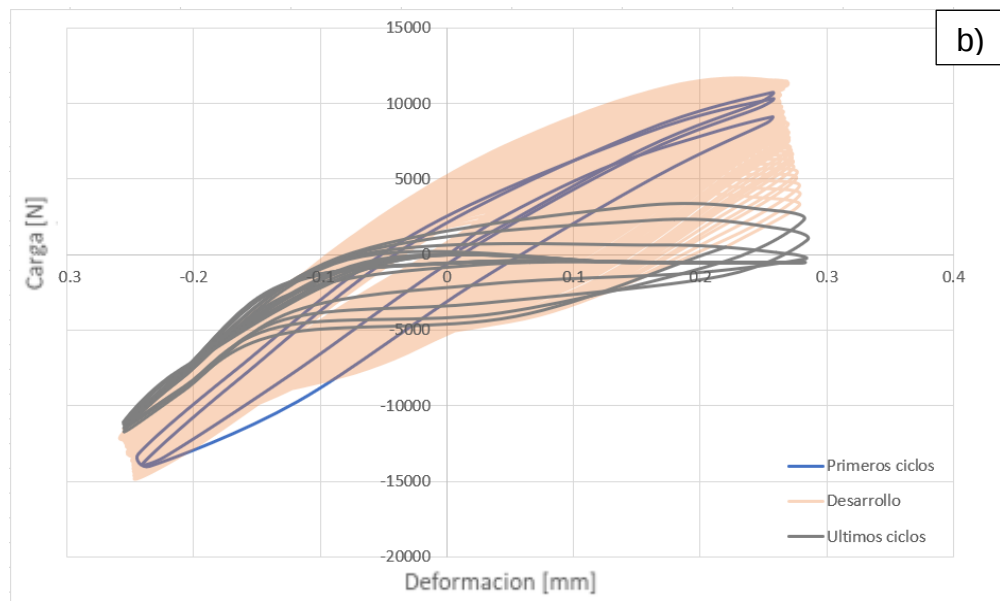
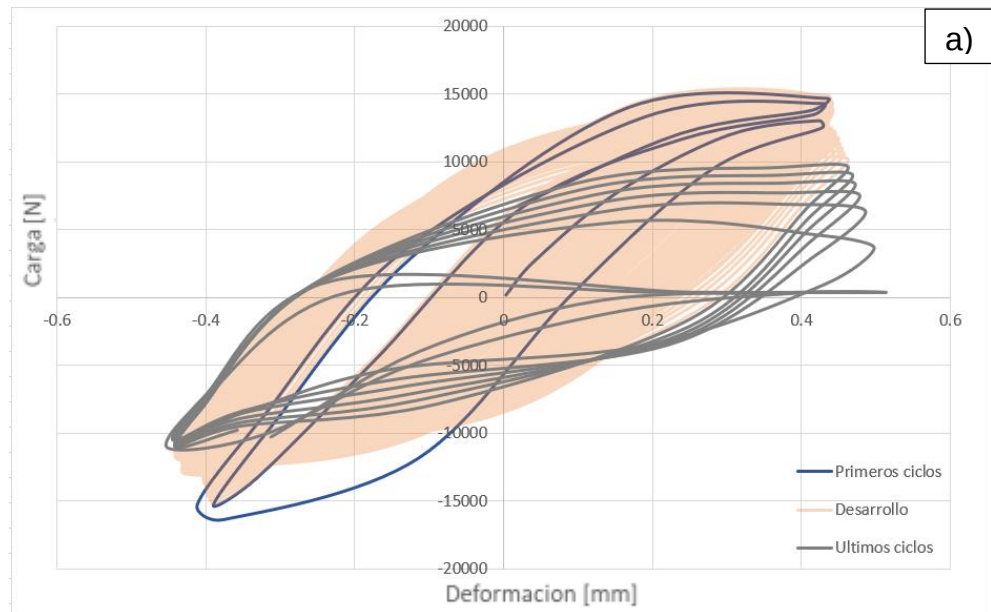


Figura 15. Fuerza vs deformación acero, a) 156 ciclos, ± 0.5 mm, b) 2527 ciclos, ± 0.281 mm.



4.2.3. Resultados ensayo de fatiga plástica. A partir de la histéresis se obtiene la carga máxima, mínima y número de ciclos en que falla el material. En la tabla 11 y 12 se observan los datos obtenidos de todos los ensayos hechos, con los cuales se puede obtener la representación de la curva $S-N_f$ (figura 16) y $\varepsilon-N_f$ (figura 17) para el aluminio y acero.

Tabla No. 11 Datos generales del aluminio.

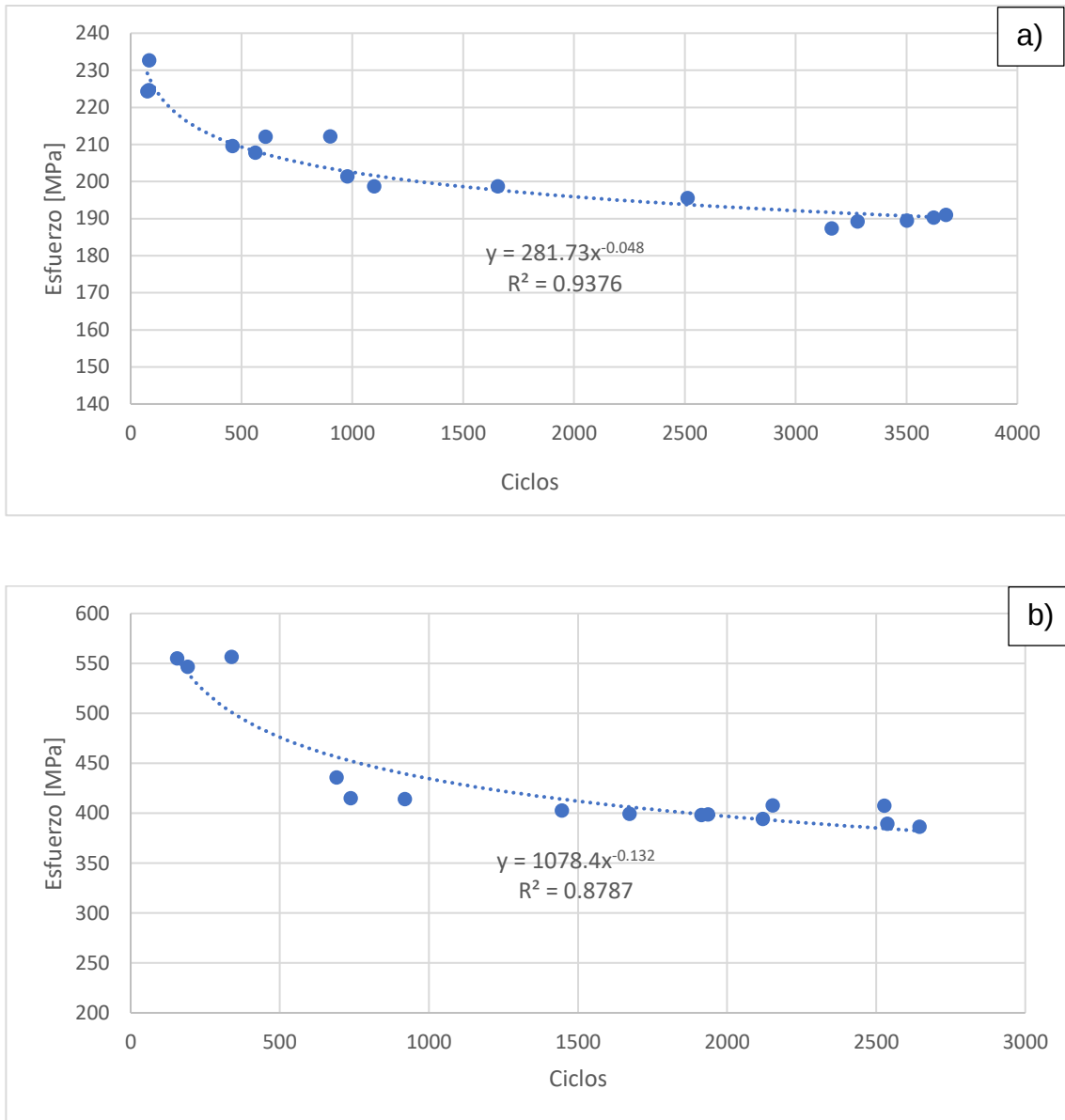
ALUMINIO						
	Deformación [mm]	Prueba	F [N]	# de ciclos	Área de Sección [mm ²]	Esfuerzo [MPa]
Punto 1	(±) 0,4236	1	8646.1	82	38.5	224.6
		2	8953.7	83	38.5	232.6
		3	8634.4	75	38.5	224.3
Punto 2	(±) 0,29075	4	8165.5	900	38.5	212.1
		5	8066.6	460	38.5	209.4
		6	8161.8	609	38.5	212.1
		7	7995.8	562	38.5	207.7
Punto 3	(±) 0,27	8	7527.1	2512	38.5	195.5
		9	7648.4	1098	38.5	198.7
		10	7448.5	1656	38.5	198.7
		11	7750.1	978	38.5	201.3
Punto 4	(±) 0,235	12	7282.7	3279	38.5	189.2
		13	7211.7	3162	38.5	187.3
		14	7323.9	3623	38.5	190.3
		15	7352.6	3678	38.5	191.1
		16	7290.4	3501	38.5	189.4

Tabla No. 12 Datos generales del acero.

Acero						
	Deformación [mm]	Prueba	Fmax [N]	# de ciclos	Área de Sección [mm ²]	Esfuerzo [MPa]
Punto 1	(±) 0,5	1	15493.2	156	28.3	459.5
		2	15239.3	338	28.3	450.5
		3	15503.4	191	28.3	459.9
Punto 2	(±) 0,351	4	12320.1	691	28.3	435.7
		5	11712.7	919	28.3	414.2
		6	11738.2	738	28.3	415.1
Punto 3	(±) 0,3	7	11190.6	1446	28.3	402.8
		8	11257.9	1914	28.3	398.1
		9	11276.4	1936	28.3	398.8
		10	11292.8	1673	28.3	399.4
Punto 4	(±) 0,285	11	11895.2	2120	28.3	394.1
		12	11527.4	2153	28.3	407.6
		13	11520.1	2527	28.3	407.4
		14	11423.2	2645	28.3	386.3
		15	11515.2	2537	28.3	389.5

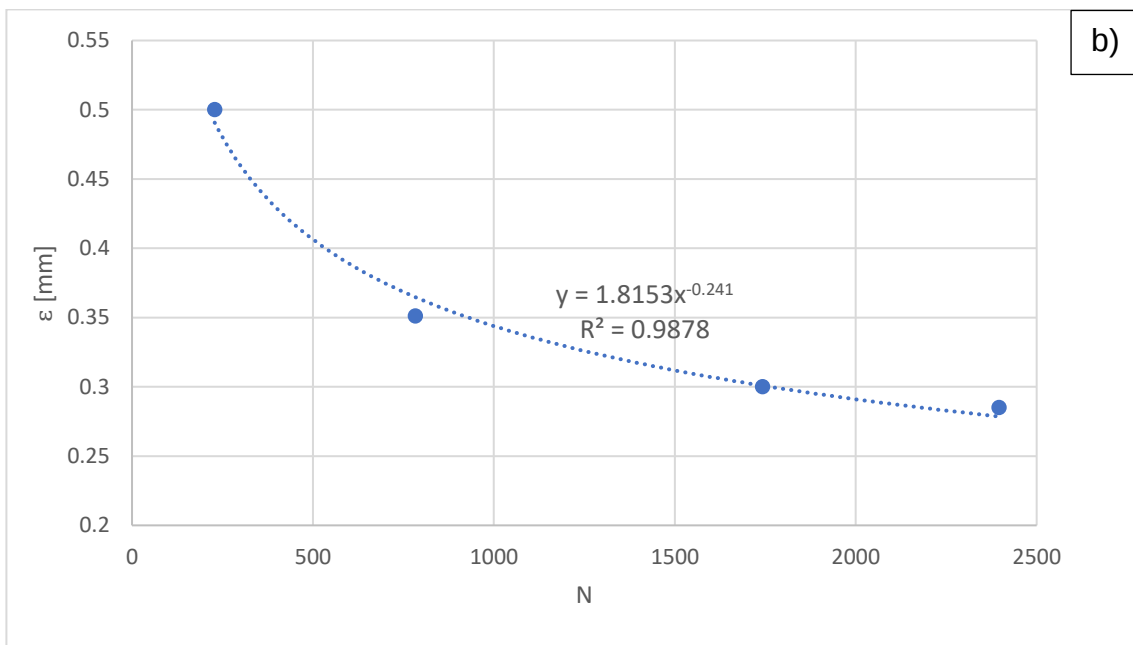
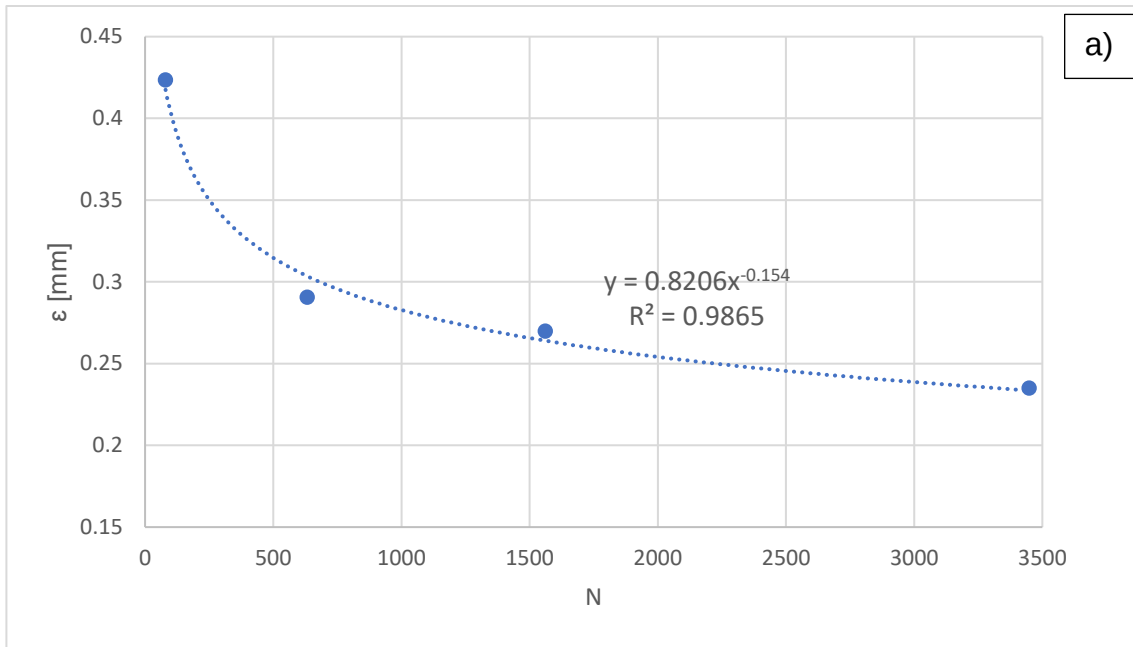
4.2.3.1. Curva esfuerzo vs número de ciclos. A partir de los datos obtenidos (Tabla No 11 y 12), se toma un promedio de la carga máxima para calcular el esfuerzo y el número de ciclos hasta la falla, que dependen de la deformación establecida, con esto se representa en un diagrama el esfuerzo versus ciclos (figura 16) conocido como la curva de Wohler.

Figura 16. Curva $S-N_f$ en zona de bajos ciclos, a) aluminio, b) acero.



4.2.3.2. Curva Deformación vs número de ciclos. Con los datos de deformación y numero ciclos se realiza una regresión para calcular la constante c y el coeficiente de ductilidad a la fatiga de la ecuación de Coffin y Manson para la zona plástica. Luego se remplazan estos valores en la ecuación y se grafica como se tiene en la figura 17.

Figura 17. Curva ε vs N_f zona de bajo ciclos a) aluminio, b) acero.



4.2.4. Tipo de fractura. En la figura 18 se tiene el modo de fractura de una probeta de aluminio con una ruptura de aproximadamente 45°.

Figura 18.fractura del aluminio.



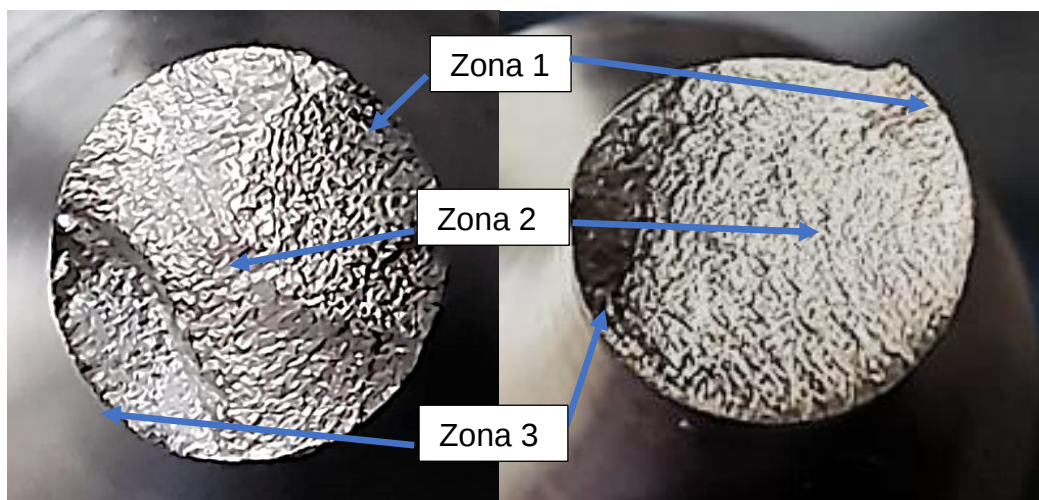
En la figura 19 se observa la fractura de dos probetas de acero y las zonas que se presentan en el área transversal para la fatiga de bajos ciclos.

Zona 1: Iniciación del defecto.

Zona 2: Propagación o avance de la grieta (líneas de playa).

Zona 3: Zona de fractura rápida.

Figura 19. Fractura del acero AISI 1045.



4.3. RESULTADOS DEL ENSAYO DE INDENTACIÓN

La máquina de Indentación al realizar el ensayo muestra en la interfaz la carga versus profundidad en tiempo real mediante una gráfica, al finalizar proporciona los datos de número de ciclos, profundidad y carga. Como se mencionó anteriormente este ensayo se realiza bajo carga controlada en la tabla 13 se pueden observar los valores de esta.

Tabla No. 13 Carga para los ensayos de aluminio y acero.

	Carga Máxima (g)			
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4
Aluminio	7000	5000	3000	2000
Acero	5000	3000	2000	1000

4.3.1. Curva carga vs profundidad. En la figura 20 y 21 se puede observar la representación gráfica de los datos obtenidos en los ensayos de indentación instrumentada (gráfica p-h), de cada material. En la tabla 14 se pueden observar los resultados de dureza experimental calculados por medio de la ecuación 6, con estos valores se hace un análisis con la ecuación de tabor (ecuación 5) con el fin de encontrar los valores de esfuerzo ultimo y así poder compararlos con el valor teórico y encontrar el porcentaje de error.

Figura 20. Indentacion del aluminio, a) 7000 g, 0.138 mm.

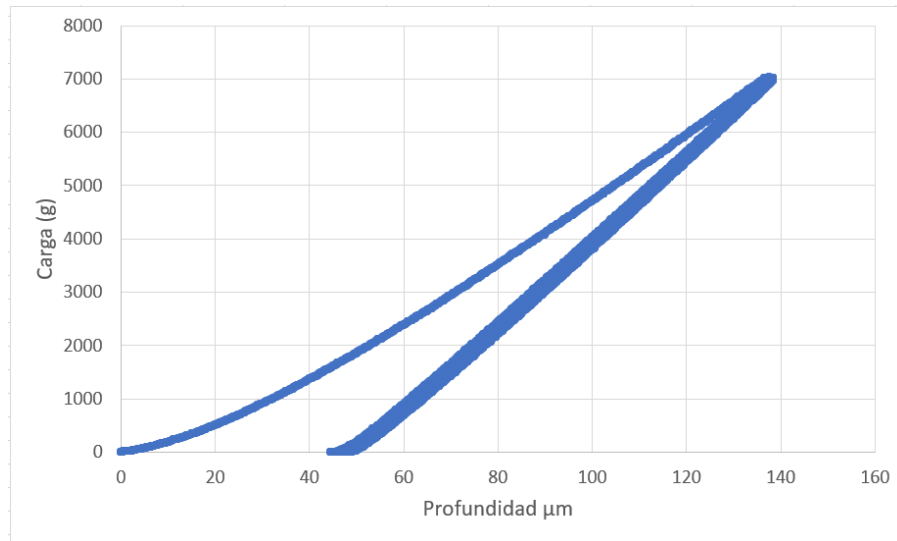


Figura 21. Indentacion del acero, a) 5000 g, 0.122 mm.

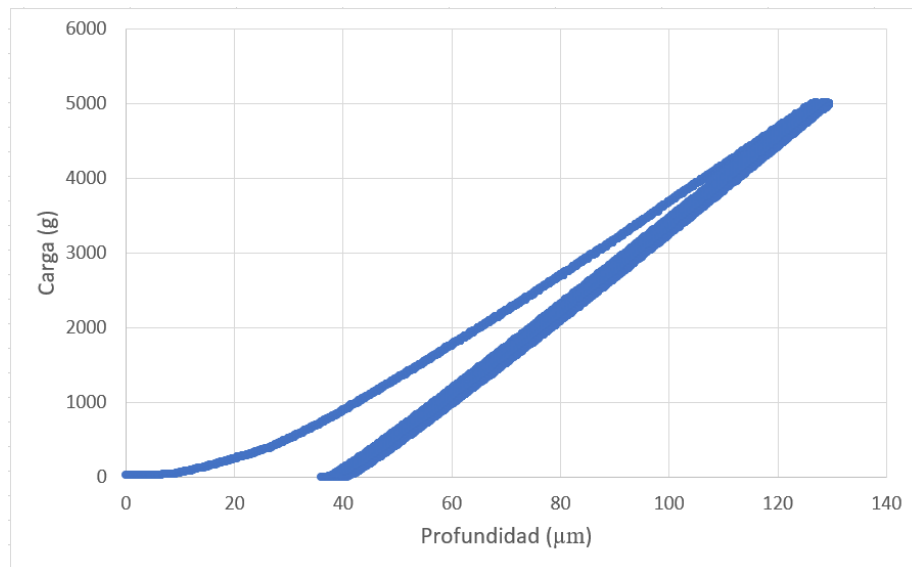


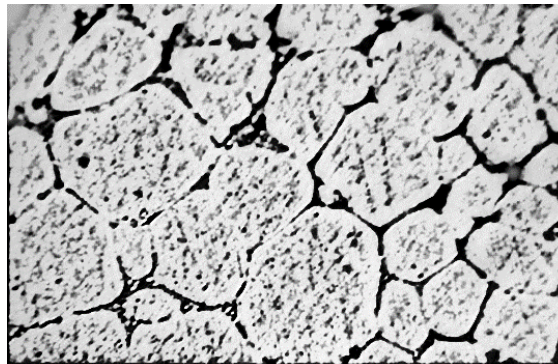
Tabla No. 14 Calculo experimental de dureza y esfuerzo ultimo.

Aluminio					
pm [Kg]	hc [mm]	HV experimental (teórico=63)	σ_u experimental [Mpa] (teórico=223)	% error HV	% error σ_u
2	0.035	66.6	239.8	5.4	7.1
3	0.043	66.2	238.3	4.8	6.4
5	0.055	67.4	242.4	6.6	8.1
7	0.065	67.6	243.4	6.8	8.3
Acero					
pm [Kg]	hc [mm]	HV experimental (teórico=180)	σ_u experimental [Mpa] (teórico=655)	% error HV	% error σ_u
1	0,015	181,4	619,2	0,7	5,4
2	0,02	204,1	640,8	13,3	2,1
3	0,025	195,9	633,6	8,8	3,2
5	0,033	187,4	630.1	4,1	3,8

4.4. METALOGRAFIA

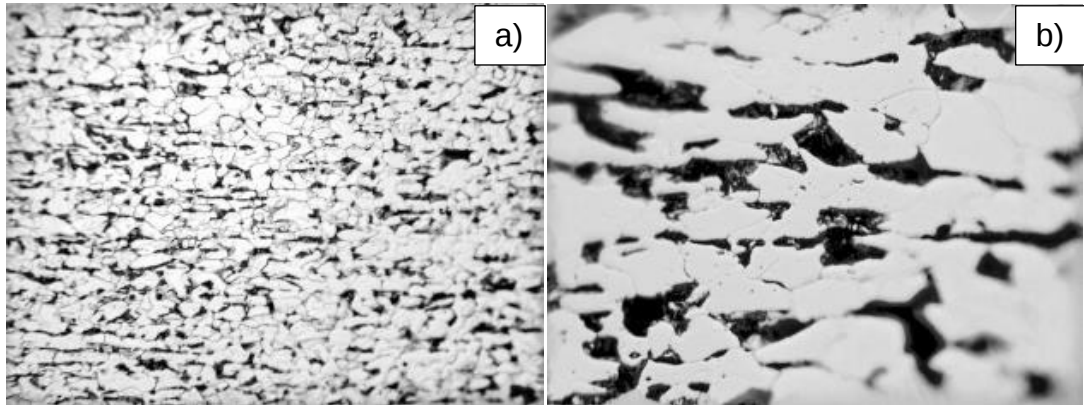
En la figura 22 se tiene una fotografía aumentada a 200x de la microestructura del aluminio.

Figura 22. Metalografía del aluminio 6063.



En la figura 23 se pueden observar dos fotografías para el caso de la 23a se tiene un aumento a 250x y en la 23b a 1000x.

Figura 23. Metalografía del acero AISI 1045 a) microscopia óptica a 250x b) microscopia óptica 1000x



5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. ENSAYO DE TRACCIÓN

En la figura 12a y 12b se observa la curva esfuerzo versus deformación del aluminio y acero respectivamente, el aluminio evidencia un comportamiento frágil mientras que el acero tiene una conducta dúctil, también se puede ver el valor de esfuerzo ultimo (σ_u) el cual comparado con el nominal tiene un porcentaje de error de 1.03% y 2.24% (tabla 8), en la tabla 9 se tiene los valores de dureza hallados a partir de σ_u por medio de la ecuación 5, este resultado se compara con el valor nominal y se obtiene un error de 3,07% y 5.26%, estos errores pueden ser producto de factores externos y defectos en la estructura de material.

5.2. ENSAYO DE FATIGA POR EL MÉTODO CONVENCIONAL

5.2.1. Carga y descarga. En la figura 13 se evidencia un comportamiento de fatiga con tensión media nula como se observa en la figura 3 ($R=-1$), la carga tiende a crecer en los primeros ciclos debido al endurecimiento del material y posteriormente a medida que avanzan los ciclos esta decae, ya que se genera una acumulación de deformación plástica hasta producir la falla, este comportamiento se presenta tanto en las pruebas de aluminio como en las pruebas de acero para cualquier deformación.

5.2.2. Histéresis. Como se había mencionado antes, la deformación se establece y por tanto se piensa que no cambia, en las figuras 14 y 15 se puede observar que esta varia cuando el número de ciclos aumenta, esto se ve mejor en los casos donde la deformación es menor o en los ensayos de mayor ciclaje debido a los fenómenos plásticos presentes en la fatiga de bajos ciclos, esta repetición cíclica (histéresis) hace que el límite de proporcionalidad de tracción y de compresión sufran cambios debido a la aplicación de tensiones fluctuantes, también se puede observar como a medida que el número de ciclos es mayor la gráfica sufre una distorsión (figura 14

b y 15 b), esto se debe a que el fenómeno de histéresis solo se ve en la zona de bajos ciclos (zona de plasticidad) y a medida que se acerca a la zona alta este tiende a cambiar el comportamiento pues se mantiene en el área elástica por lo cual se inclina a convertirse en una “línea”.

Figura 24. Histéresis del aluminio, 82 ciclos, ± 0.42361 , primeros ciclos.

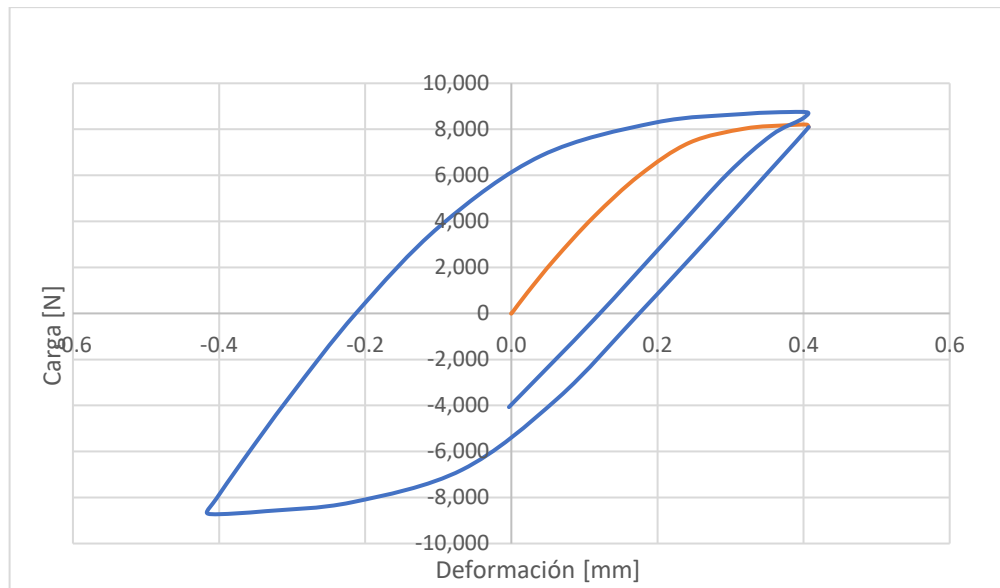
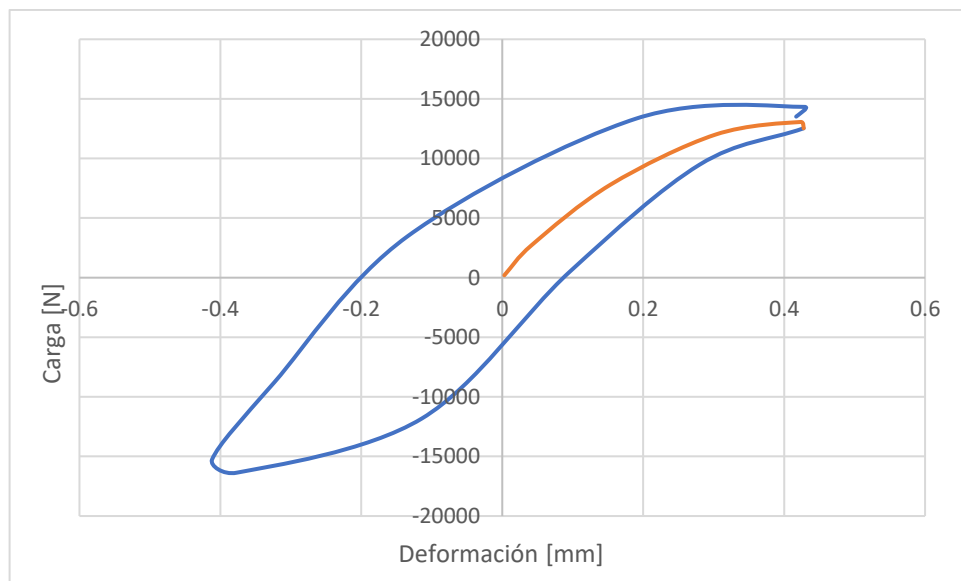


Figura 25. Histéresis del acero, 191 ciclos, ± 0.5 , primeros ciclos.



En la figura 24 y 25 se aprecia que el material se endureció (figura 4) debido al comportamiento elastoplástico, en la gráfica se observa que al finalizar el primer ciclo está por encima de la curva de carga conocida como curva monotónica lo cual indica que se necesitó una mayor fuerza para llegar a un punto cercano de deformación después de que el material se haya sometido a tensión y/o compresión.

5.2.3. Curva de fatiga plástica $S-N_f$. Para la construcción de la curva $S-N_f$ se realizaron varios ensayos por cada deformación, a mayor número de ciclos, se hicieron más pruebas debido a que los datos se dispersan como se puede evidenciar en la figura 16. Esto se debe a que las probetas no presentan la misma homogeneidad y a mayor ciclaje implica un aumento de tiempo en el ensayo provocando fuentes de error como vibraciones externas y/o desalineación de la probeta.

Como se puede observar para el ensayo de aluminio y acero no se sobrepasaron los 10 mil ciclos ya que las deformaciones encontradas están entre el 90% y 70% del esfuerzo ultimo presente en la curva de tracción de cada material, lo que corrobora la teoría (Norma ASTM E606)⁴¹.

Para ambos ensayos los datos obtenidos presentaron dispersiones en la curva de fatiga ($S-N_f$), para la prueba de acero más que la del aluminio por las fuentes de error mencionadas anteriormente, aun así, el comportamiento de las curvas es el esperado con el teórico, estas presentan una conducta decreciente lo cual indica que a menor esfuerzo mayor número de ciclos

⁴¹ AMERICAN NATIONAL STANDARD. ASTM E606/E606M-12 Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing”, 2012. pp. 1–16.

5.2.4. Curva de deformación versus número de ciclos ϵ vs N_f . En la figura 17 a y 17 b se tiene la curva deformación versus número de ciclos para aluminio y acero respectivamente, como dice la teoría se evidencia que a menor deformación mayor número de ciclos para la fatiga plástica, también se puede ver como la ecuación de la curva se ajusta al modelo de Coffin y Manson con una correlación del 0,9865 y 0,9878. Por el comportamiento de la curva también se puede notar como a medida que se acerca a ciclos altos la pendiente disminuye cambiando su conducta por la disminución de deformación plástica acercándose a la vida infinita donde el régimen está en la zona elástica.

5.2.5. Tipo de fractura. En la figura 18 se observa una superficie áspera y cristalina lo cual indica que el material tiene un comportamiento frágil y que la velocidad de propagación fue rápida, también se ve que la fractura tiene aproximadamente un Angulo de 45° , esto muestra que la rotura fue producida por fatiga en el elemento, debido a la estructura cristalina del material no es posible visualizar líneas playa.

En la figura 19 el acero presenta 3 zonas evidenciando como lo dice la teoría los modos de falla en ensayos tensión compresión y la forma de la fractura muestra la ductilidad de este material, también se puede ver el proceso en que se genera la fractura, la zona 1 es donde se inicia la falla y se ven las primeras líneas playa, la zona 2 es la dirección en la que crece, al trabajar en ciclos bajos las marcas de playa pueden apreciarse ya que tienen un mayor espaciamiento, la zona 3 es la última etapa donde crece rápidamente la fractura, esta zona es la más áspera y por último se encuentra el filo de corte.

5.3. ENSAYO DE INDENTACIÓN INSTRUMENTADA

En las figuras 20 y 21 se puede observar como el valor de la fuerza se mantiene casi constante, a pesar de que la deformación durante el primer ciclo es mayor y seguido a esta las penetraciones son cada vez menores, esto indica que el material sufre un endurecimiento, también se ve como el área bajo la curva es más grande

bajo la primera carga y descarga y en los siguientes es mucho menor, lo cual evidencia que allí se usa la mayor parte de la energía para deformar el material.

En la tabla 14 se pueden observar los resultados del cálculo hecho por medio de la ecuación de Tabor (ecuación 5), allí se evidencia que el porcentaje de error está tiene valores bajos lo cual indica que la relación se cumple, también se encuentra el cálculo hecho a partir de la ecuación 6 y se tienen valores bajos de error, esto señala que la geometría del indentador está en buen estado y son satisfactorios los datos obtenidos.

En la figura 7 se observa el comportamiento del material a partir del análisis de la gráfica, si la comparamos con las figuras 20 y 21 es claro que para los dos materiales hay una conducta elastoplastica debido a que presentan una recuperación, en la tabla 17 se pueden ver los porcentajes de recuperación los cuales convergen a un mismo valor para cada material, también se observa como la pendiente de la curva en la descarga tiende al mismo valor para todas las pruebas (tabla 15), esto revela que el comportamiento elastoplástico del material se mantiene a pesar del cambio de carga y deformación y a medida que va disminuyendo la fuerza, el material va sufriendo una recuperación elástica a una rata similar en todas las pruebas.

Tabla No. 15 pendiente de descarga curva P-h.

Aluminio			Acero		
Carga [N]	Pendiente	Correlación	Carga [N]	Pendiente	Correlación
70	77,1	0,9998	50	56,6	0,9996
50	75,1	0,9985	30	57,1	0,9996
30	74,7	0,9968	20	55.1	0,9995
20	70,3	0,9969	10	52,5	0,9980

5.4. METALOGRAFÍA

En la figura 22 se tiene la microestructura del aluminio, allí se puede observar la aleación que forma con el silicio y el manganeso formando el Mg_2Si por la forma de líneas y el tono más oscuro es posible decir que este se encuentra en estado β , también se puede notar una buena homogeneidad en el tamaño de grano del material.

En la figura 23 se observa la microestructura del acero, allí se evidencia la formación de perlita en las zonas claras y ferrita en las zonas oscuras, la distribución de los granos enseña el comportamiento habitual en un acero al carbono dúctil.

En el caso de la fatiga a bajos ciclos las microgrietas existentes en el material se dice que no tienen una relevancia significativa ya que al estar en esta zona la fatiga se produce por la acumulación de las deformaciones plásticas y no por el crecimiento de estos micro defectos.

5.5. ANÁLISIS DE LA COMPARACIÓN ENTRE FATIGA POR HISTÉRESIS E INDENTACIÓN INSTRUMENTADA

En la figura 26 se tiene la representación gráfica de los datos de un ensayo de fatiga por el método convencional durante el primer ciclo de carga y descarga. En la figura 27 se observa de igual manera el primer ciclo, pero en este caso para la prueba de indentación instrumentada, en las dos graficas se tienen las ecuaciones de las curvas, esto con el fin de hallar el área que representa la energía necesaria para deformar el material y así poder realizar una comparación buscando posibles relaciones entre ellas.

Figura 26. Histéresis primer ciclo.

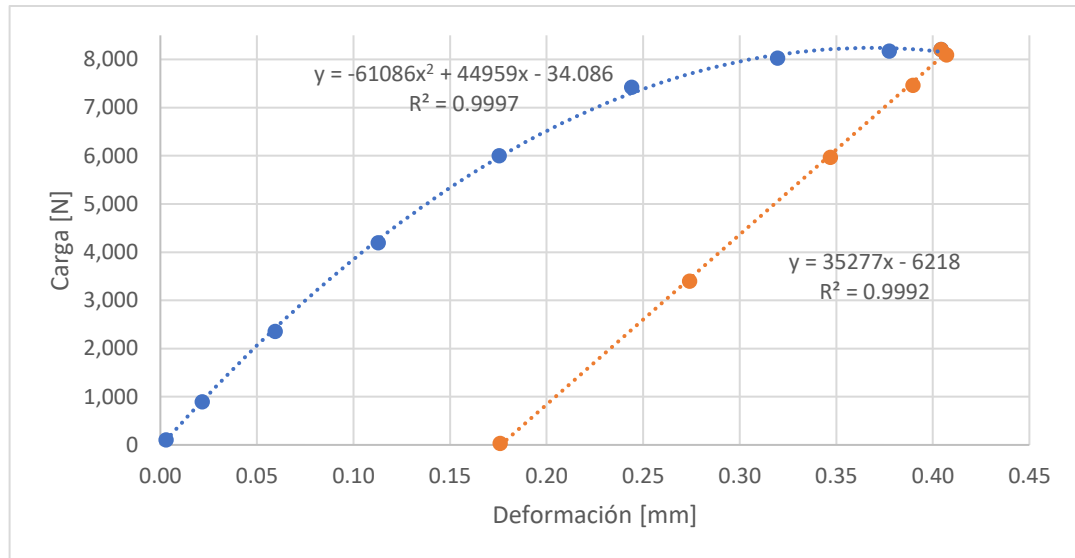
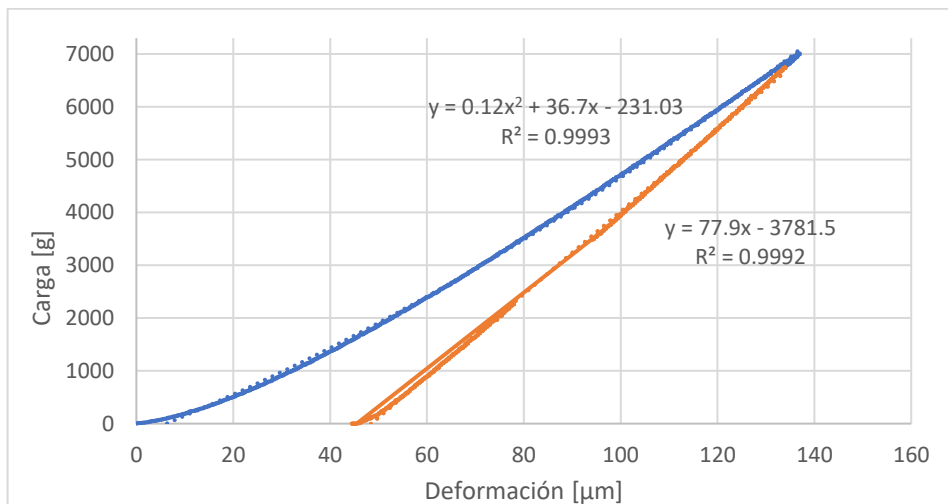


Figura 27. Indentación primer ciclo.



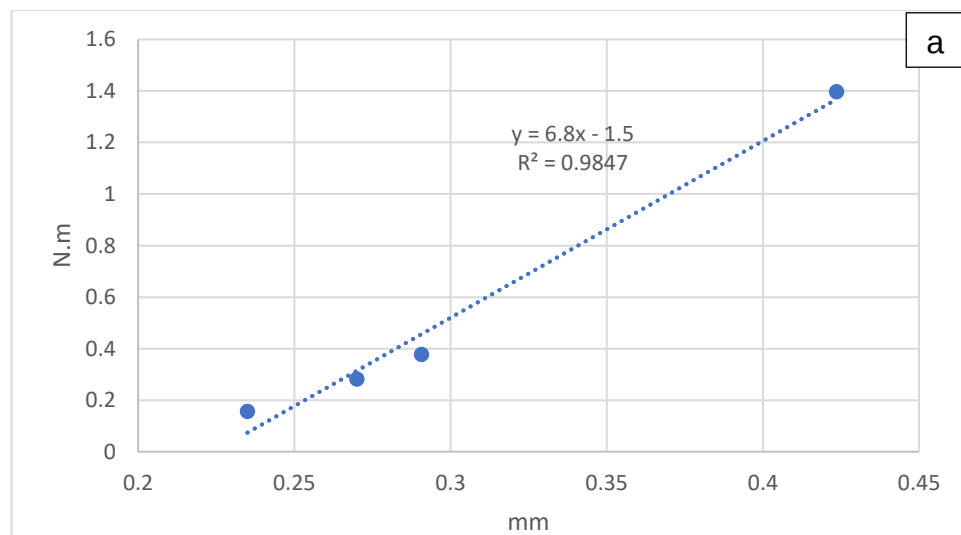
Este procedimiento se realizó para cada una de las pruebas de Fatiga plástica e indentación Dinámica, luego se hizo el cálculo de la media para cada ensayo. En las tablas 16 y 17 se presentan los valores obtenidos de carga, deformación y áreas bajo la curva en el primer ciclo para cada prueba por el método de tensión-compresión e indentación instrumentada.

Tabla No. 16 Fatiga plástica: Energía, carga, deformación, recuperación elástica para aluminio y acero.

HISTÉRESIS (aluminio)			
Energía [N.m]	Carga [N]	Deformación [mm]	Recuperación Elástica [%]
1.397	8900	0.42	37
0.3776	8000	0.29	18
0.281	7500	0.27	21
0.1559	7090	0.23	20
HISTÉRESIS (acero)			
Energía [N.m]	Carga [N]	Deformación [mm]	Recuperación Elástica [%]
1.116	15671	0.501	20
0.705	12076	0.351	28
0.5	11371	0.311	23
0.49	11070	0.285	24

En la figura 28 se puede observar la representación gráfica de los datos de energía vs deformación de la tabla 16, también se tienen las ecuaciones de las curvas halladas por medio de regresiones lineales.

Figura 28. Energía vs deformación, Fatiga convencional del a) aluminio, b) acero.



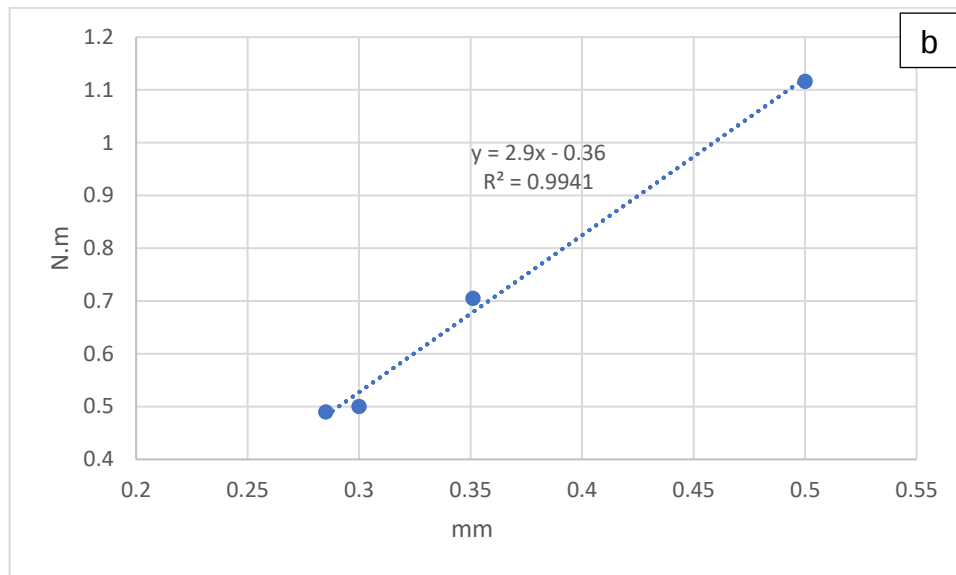
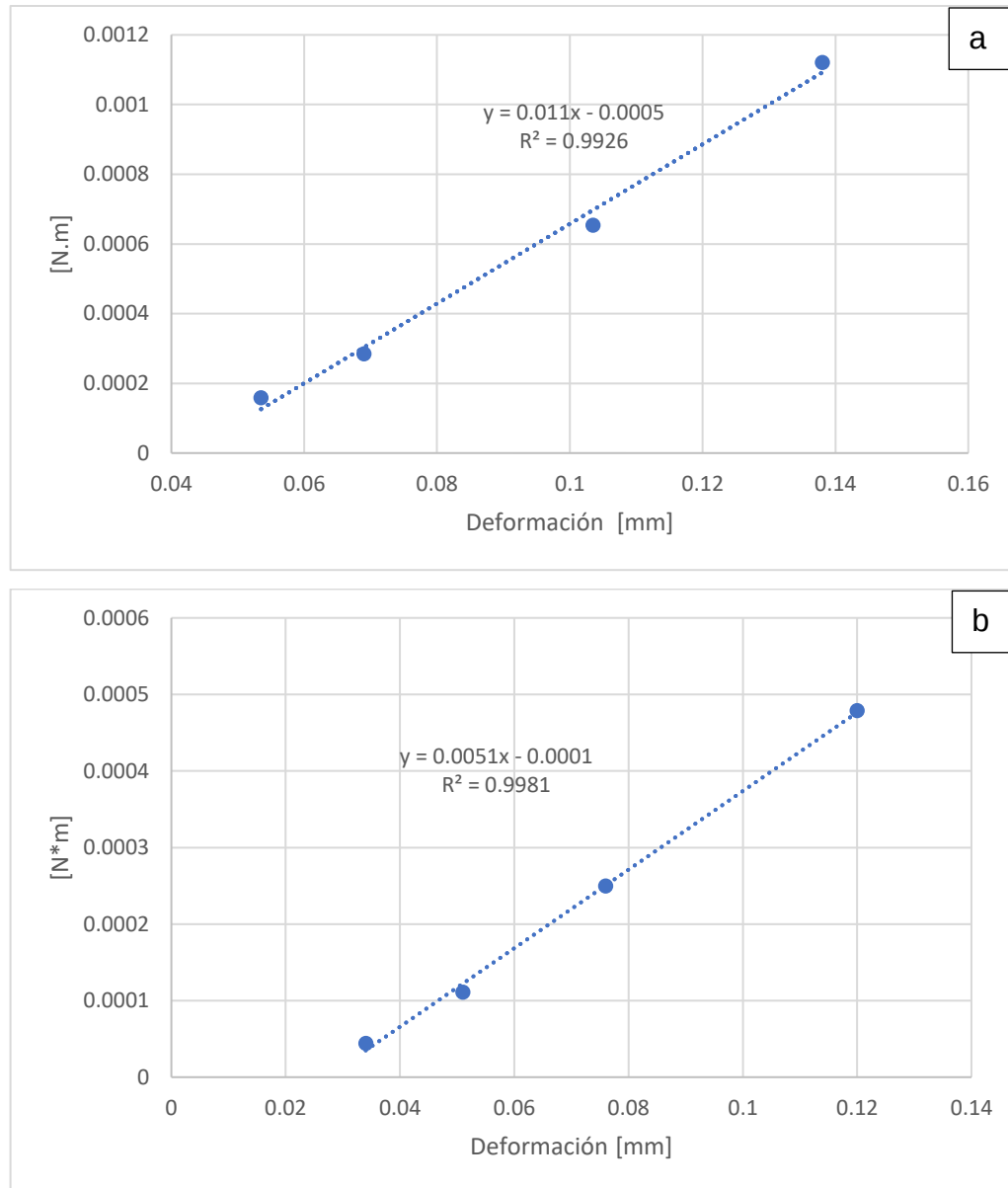


Tabla No. 17 Indentación instrumentada: energía, carga, deformación, recuperación elástica para aluminio y acero.

INDENTACIÓN (aluminio)			
Energía [N.m]	Carga [N]	Deformación [mm]	Recuperación Elástica [%]
0.00112	70	0.138	41
0.00065	50	0.1035	40
0.00028	30	0.069	35
0.00015	20	0.0535	34
INDENTACIÓN (acero)			
Energía [N.m]	Carga [N]	Deformación [mm]	Recuperación Elástica [%]
0.00047	50	0.12	25
0.00025	30	0.076	24
0.00011	20	0.051	30
4.41E-05	10	0.034	32

En la figura 29 se puede observar la representación gráfica de los datos de energía vs deformación de la tabla 17, también se tienen las ecuaciones de las curvas halladas por medio de regresiones lineales.

Figura 29. Energía vs deformación, indentación del a) aluminio, b) acero.



A continuación, se presentan las gráficas obtenidas en los ensayos de fatiga convencional e indentación instrumentada (figura 30 y 31) donde cada punto representa la carga y deformación máxima (tabla 16 y 17) de cada prueba, allí podemos observar el comportamiento para la curva carga versus deformación en los dos casos.

Figura 30. Carga versus deformación por Fatiga plástica para el a) aluminio, b) acero.

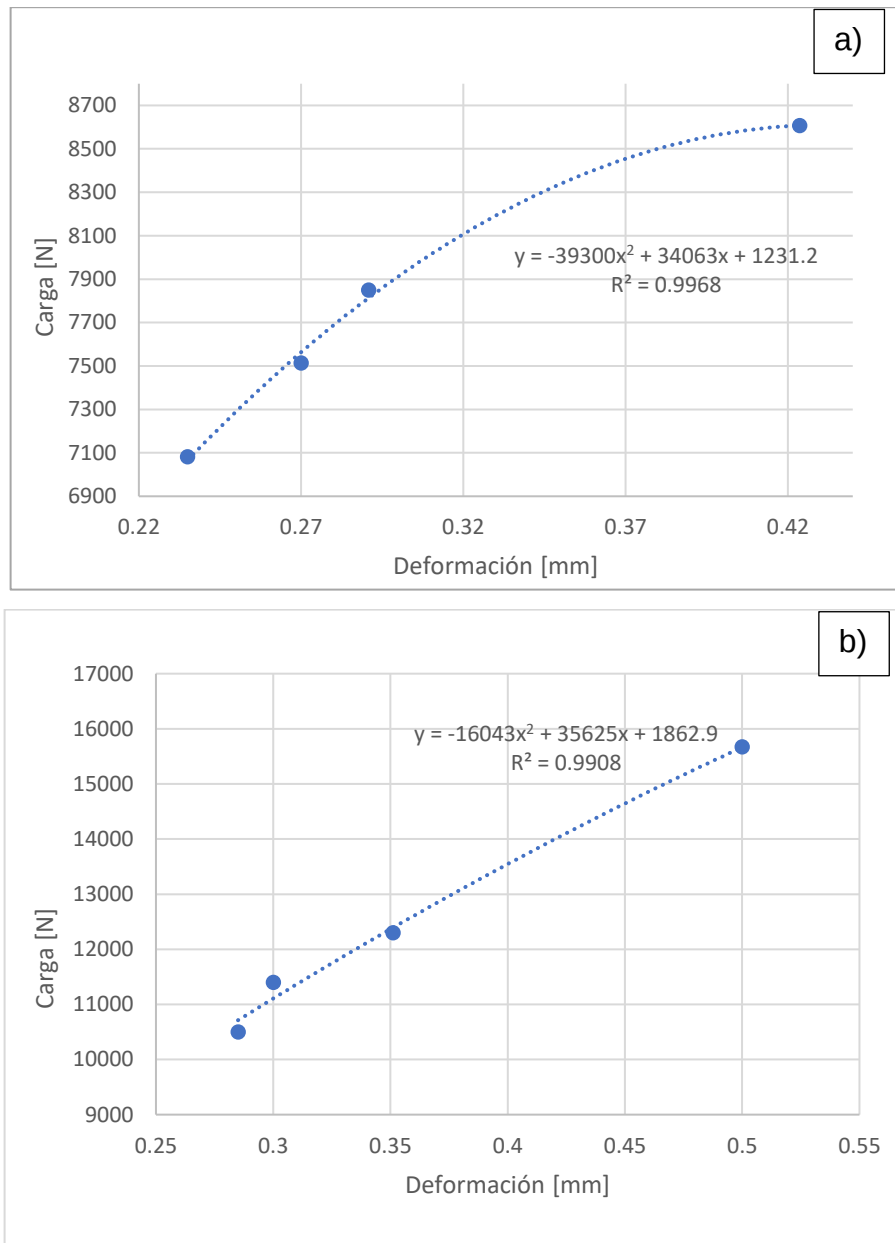
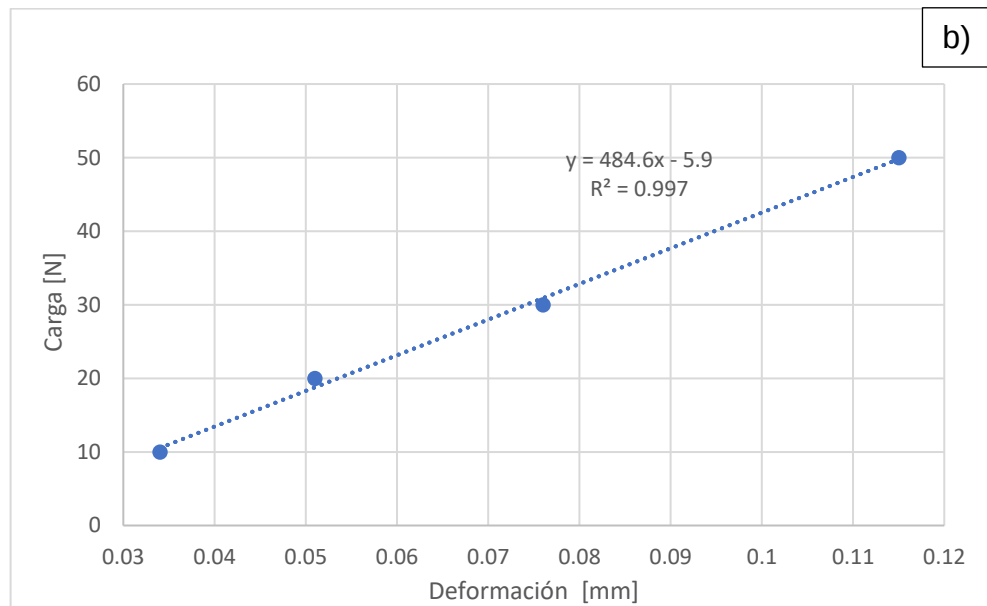
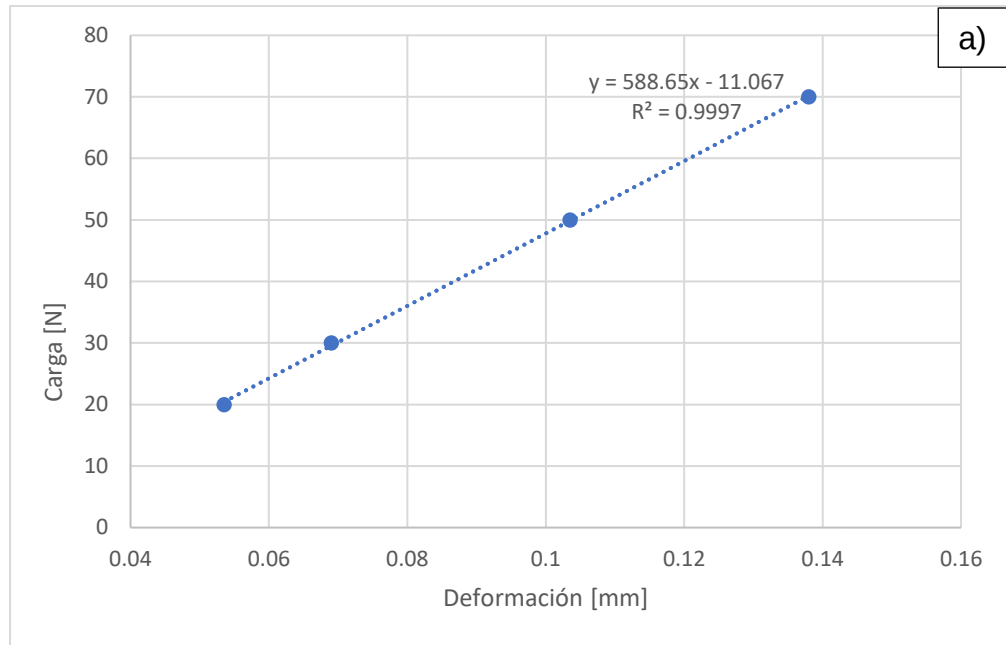


Figura 31. Carga versus deformación por indentación para el a) aluminio, b) acero.



En las figuras 26 y 27 se tiene el primer ciclo de carga y descarga para cada método, de allí se realiza el cálculo de la energía requerida para deformar el material de manera elastoplástica (área bajo la curva), al hacer los dos tipos de prueba en un mismo material la energía absorbida deberá ser equiparable entre los métodos, en

las figuras 28 y 29 se evidencia esta teoría, allí se ve como ambas curvas tienen un comportamiento creciente donde a mayor deformación, mayor es la energía requerida, por lo tanto se podría plantear la siguiente ecuación.

$$A_h * K = A_i \quad (9)$$

Donde:

A_i = área bajo la curva de grafica p-h (indentación instrumentada).

A_h = área bajo la curva de grafica de histéresis.

K = Constante de proporcionalidad.

De esta manera al remplazar las ecuaciones de las curvas tanto para el acero como para el aluminio en la ecuación 9, da como resultado un valor de $1,66 \cdot 10^{-3}$ para el aluminio y $1,7 \cdot 10^{-3}$ para el acero, viendo esto es posible considerar este número como una constante de proporcionalidad de energía de deformación para estos materiales. Ahora bien, es posible el uso de esta fórmula para construir la curva de fatiga por el método de indentación instrumentada como se muestra a continuación.

Calculo tipo para el aluminio:

De la tabla No 17 se toman los valores de área bajo la curva de indentación del aluminio: 0.00112 N.m .

Se calcula las áreas equivalentes de indentación a histéresis (método convencional) usando la ecuación 9.

$$A_{h_i} = \frac{0.00112 \text{ N.m}}{0.00166} = 0.675 \text{ N.m}$$

Donde:

A_{h_i} : área bajo la curva corregida de indentación a histéresis.

Luego de hallar A_{h_i} se procede a encontrar la deformación equivalente en la curva de energía versus deformación (figura 28a) por medio de la ecuación que se ajustó a esta (ecuación 10).

$$A_h = 6.86 * d_h - 1.54 \quad (10)$$

Donde

d_h : deformación histéresis.

$$0.675 \text{ N.m} = 6.86 * d_h - 1.54$$

$$d_{h_i} = 0.323 \text{ mm}$$

Donde

d_{h_i} : deformación de indentación corregida a histéresis.

Teniendo d_{h_i} es posible encontrar el valor de carga y el número de ciclos correspondientes para la gráfica de indentación, se construye la curva carga vs deformación (figura 30a) y deformación vs ciclos (figura 17a) de los datos obtenidos de la prueba de fatiga plástica y se sustituyen los valores de d_{h_i} en las ecuaciones correspondientes de las curvas (ecuación 11 y ecuación 12).

$$F = -424452 * dh_i^2 + 35863 * dh_i + 1172.7 \quad (11)$$

$$F = -42445 * (0.323 \text{ mm})^2 + 358638 * 0.323 \text{ mm} + 1172.7$$

$$F = 8327.6 \text{ N}$$

$$dh_i = 0.8206 * N^{-0.154} \quad (12)$$

$$0.323 \text{ mm} = 0.8206 * N^{-0.154}$$

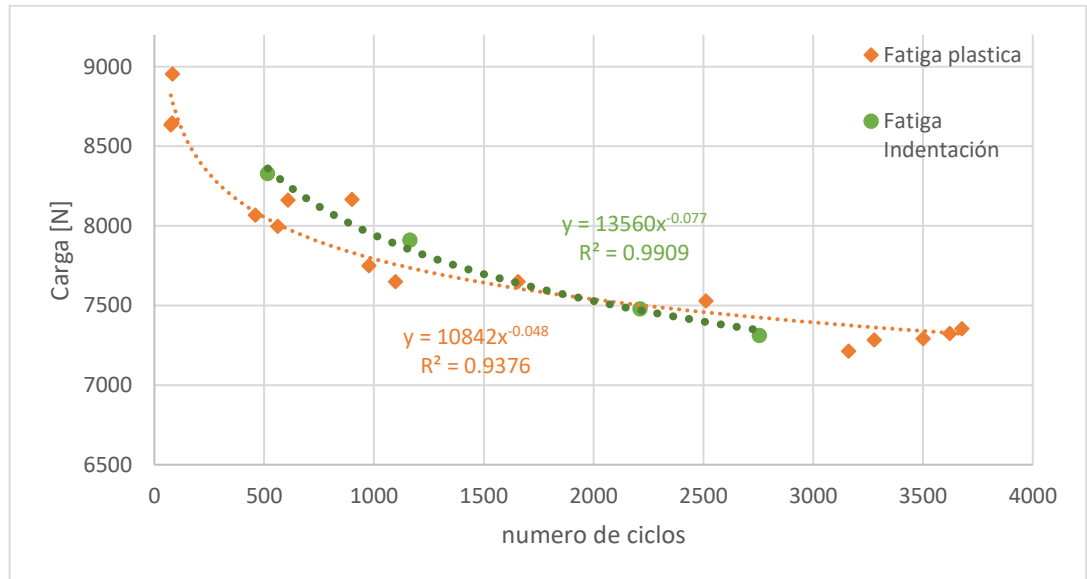
$$N = 516.15 \text{ ciclos}$$

Luego de calcular los valores de carga y numero de ciclos equivalentes de indentación a histéresis (tabla 18) es posible construir la gráfica de fatiga fuerza vs ciclos (figura 32) la cual se compara con la curva de fuerza vs ciclos construida por fatiga plástica.

Tabla No. 18 Áreas equivalentes de indentación a histéresis del aluminio.

Energía i [N.m]	Energía i->H [N.m]	Deformación [mm]	Fuerza [N]	Ciclos
0.00112	0.663	0.323	8327.62	516
0.00065	0.387	0.281	7909.91	1163
0.00028	0.168	0.249	7478.25	2212
0.00015	0.093	0.238	7310.48	2755

Figura 32. Fatiga por indentación y fatiga plástica, carga vs ciclos, aluminio.

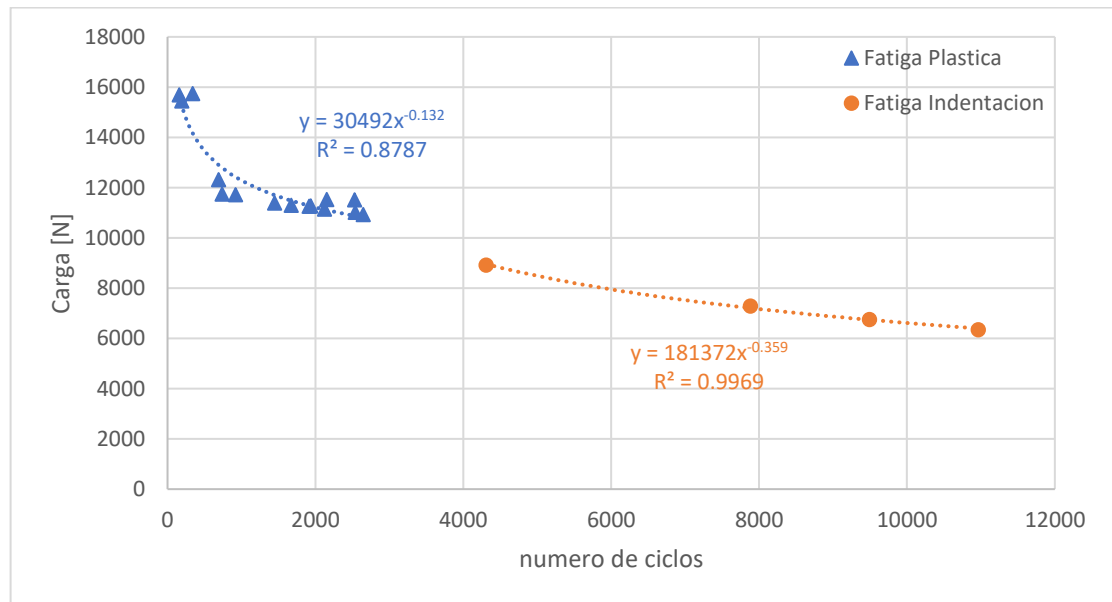


Para el acero se realiza el mismo procedimiento que para el aluminio con las gráficas y ecuaciones correspondientes, los valores encontrados se pueden apreciar en la tabla 19, y la gráfica resultante se ve en la figura 33.

Tabla No. 19 Áreas equivalentes de indentación a histéresis del acero.

Energía i [N.m]	Energía i->H [N.m]	Deformación [mm]	Fuerza [N]	Ciclos
4.41E-05	0.026	0.1338	6344.77	10964
0.000112	0.0658	0.1470	6757.54	9492
0.000197	0.116	0.1640	7281.77	7880
0.000478	0.281	0.2192	8918.42	4308

Figura 33. Fatiga por indentación y fatiga plástica, carga vs ciclos, acero.



Para el acero se tiene un error mayor debido a que la curva construida en indentación instrumentada se encuentran en una zona de mayores ciclos, cuando se habla de bajos ciclos se dice que están entre 1,000 y 10,000 como lo mencionan algunos autores, por lo cual la fatiga de bajos ciclos presenta un comportamiento diferente a la fatiga de altos como se evidencia en la teoría, esto se puede observar en la figura 33 donde evidentemente parte de la curva sobrepasa los 10000 ciclos.

6. CONCLUSIONES

- El método de ensayo de fatiga convencional usado en este caso dio como resultado la construcción de la curva de Wohler en la zona de bajos ciclos y la curva de Coffin y Manson las cuales mostraron comportamientos congruentes con la teoría, por lo cual se puede decir que esta forma de ensayo cumple con su objetivo y proporciona datos confiables, no obstante, se requiere de un gran número de pruebas y probetas para lograr la construcción de un tramo de las curvas mencionadas. El ensayo de indentación instrumentada arroja resultados positivos en cuanto a la posibilidad de realizar pruebas de fatiga por este método, fue posible construir la curva fuerza versus número de ciclos y abre las puertas a seguir utilizando esta alternativa para corroborar los estudios existentes.
- Fue posible construir las curvas de fatiga en la zona de ciclos bajos $S-N_f$ y $\mathcal{E}-N_f$ a partir de los datos adquiridos por medio de los ensayos de fatiga por el método convencional, se tuvo un comportamiento inversamente proporcional donde a menor deformación mayores ciclos tanto para el aluminio como para el acero.
- El análisis del fenómeno de fatiga por el método de indentación instrumentada dio como resultado la construcción de la curva fuerza versus número de ciclos con una forma similar a lo que indica la teoría y los ensayos hechos por otros métodos para la zona de ciclos bajos, por esto es posible concluir que puede ser viable usar esta prueba como forma de estudiar este comportamiento que presentan los materiales metálicos al ser sometidos a cargas fluctuantes, no obstante es necesario realizar más estudios con el fin de analizar este fenómeno en la zona de ciclos altos por medio de este tipo de ensayo.
- Al realizar la comparación del ensayo por el método convencional y los datos arrojados por indentación instrumentada se encontraron relaciones entre las gráficas de energía requerida para deformar el material versus

deformación y se halló un factor de corrección para los dos materiales de estudio, en la comparación con el método convencional se obtuvo un comportamiento y forma similar para la curva de aluminio, para el acero se obtuvo una gráfica con forma parecida pero un poco más alejada de la del método tradicional esto debido a que se encontró en una zona más alta de ciclos punto donde la dispersión es mayor.

- Por medio del análisis del modo de fallo del material se concluyó que el aluminio presento un comportamiento frágil mientras que el acero tuvo conducta dúctil de tal manera que fue posible identificar las zonas de falla en el área de fractura de las probetas. En la microestructura fue posible observar en el aluminio el compuesto Mg_2Si entre los granos de Al en forma β y para el acero se evidencio que tenía en su mayoría formaciones de ferrita y perlita.

7. RECOMENDACIONES

- Se recomienda mayor cantidad de ensayos por cada prueba con el fin de obtener mayor confiabilidad en los resultados en los ensayos de tensión-compresión.
- Construir la curva de fatiga completa incluyendo la fatiga en bajos y altos ciclos y buscar la relación con la indentación instrumentada.
- Realizar el estudio con una relación de esfuerzos diferente a -1 en la zona de compresión de la fatiga convencional.
- Efectuar mayor número de ensayos de indentación instrumentada a diferentes cargas como lo permita la máquina.
- Realizar este mismo procedimiento con otro tipo de metales.

BIBLIOGRAFIA

AMERICAN NATIONAL STANDARD. ASTM A370:12 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products 1", 2012. pp. 1–48.

AMERICAN NATIONAL STANDARD. ASTM E3-01e1 Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens", 2012. pp. 1–40.

AMERICAN NATIONAL STANDARD. ASTM E606/E606M-12 Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing", 2012. pp. 1–16.

AMERICAN NATIONAL STANDARD. ASTM E384-17 Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials", 2017. pp. 1–40.

AMERICAN NATIONAL STANDARD. ASTM E8/E8M–16a Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials1", 2012. pp. 1–30.

AVILÉS, Rafael. Análisis de Fatiga en Máquinas, 2005, pp. 199–207.

BADIOLA, V. Cargas variables, 2004. pp. 55–79.

BANERJEE, B. R. Study of Glass Dynamics Propieties," *J. of American Ceramic Society*, 1987. no. Vol, p. 10.

BERMUDEZ JIMENEZ, R. Modelo físico de plastilina para el estudio del modo de deformación de materiales bajo indentación, 2011.

CALLISTER, William. Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales in *Reverté*, 1995, pp. 114–146.

ESCACENA, J. Caracterización de las Propiedades Mecánicas del Aluminio 7075-T651, pp. 9–23.

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA JULIO GARAVITO, fatiga protocolo Curso de Materiales, 2008.

FEDERACIÓN DE ENSEÑANZA DE CC.OO. DE ANDALUCIA, Metalografía Introducción, 2011, pp. 1–14.

FORMACION PROFESIONAL REGLADA, Diseño de construcciones metálicas, CFGS Constr. Met.

JIMÉNEZ, Julián. Tracción de probetas metálicas, no. September, 2018.

MEZA, Juan; CHAVES, Cesar; VÉLEZ, Juan. Técnicas de indentación: medición de propiedades mecánicas en cerámicas, Dyna, no. 149, 2005, pp. 81–93.

MEZA, Juan, *et al.* Using the ultrasound and instrumented indentation techniques to measure the elastic modulus of engineering materials,” Rev. Met., vol. 44, 2008 no. 70, pp. 52–65.

ORTEA, Enrique. Ensayos de dureza,” Ceram. Int, 2010, pp. 1–8.

ORTIZ, J. Comportamiento Mecánico del acero 35NCD16 Sometido a Ensayos de Fatiga a Bajo Ciclo, Universidad Industrial De Santander, 2013.

PERTUZ, Alberto. La indentación aplicada a la caracterización estática y dinámica de materiales, pp 1-8.

TABOR, D. The Hardness of Metals. *Clarendon Press. Oxford*, 1951.

TORRES, Edwar; ARBELAEZ, Juan. Caracterización de aleación de aluminio aa6063-t5 mediante microscopía óptica, electrónica de barrido y electrónica de transmisión, *Rev. Colomb. Mater.*, pp. 59–64.

UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES. Introducción a la fatiga, 2015.

VALLELLANO, Martin. Crecimiento de grietas pequeñas por fatiga en componentes con concentradores de tensión, Universidad de Sevilla, 1998.

VANLANDINGHAM, M. Review of instrumented indentation, *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, vol. 108, 2003, no. 4, p. 249.

XU, Baoxing. Xu; YUE, Zhufeng; WANG, J. Indentation fatigue behaviour of polycrystalline copper, *Mech. Mater.*, 2007, vol. 39, no. 12, pp. 1066–1080.

ANEXOS

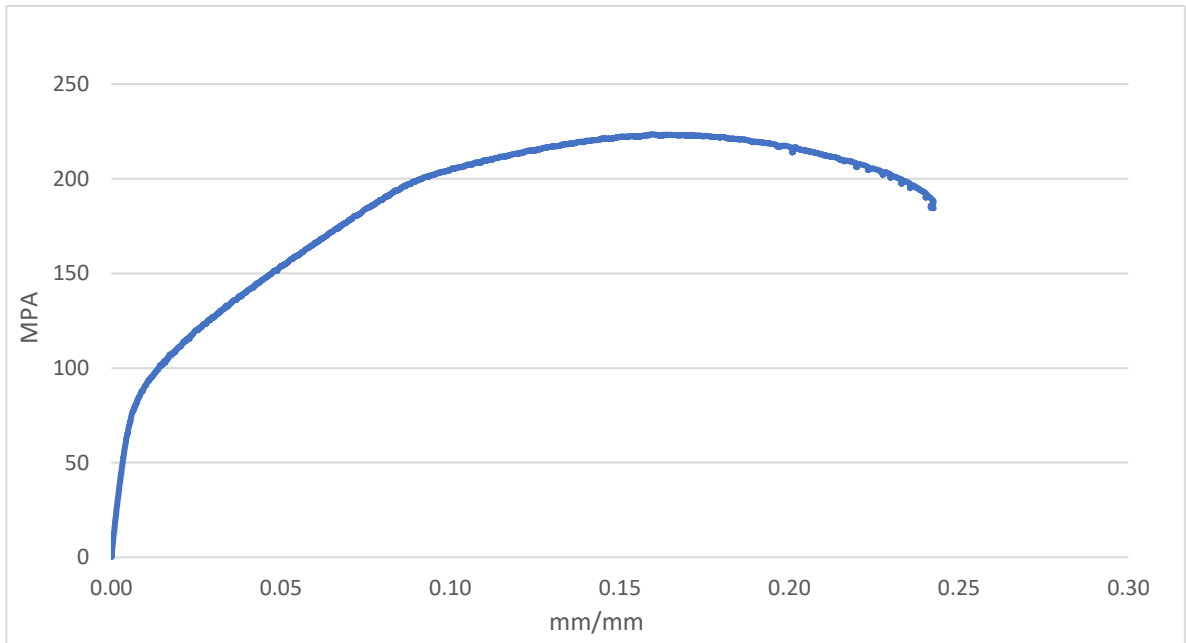
Anexo 1. Probetas de aluminio y acero para el ensayo de fatiga a bajos ciclos.



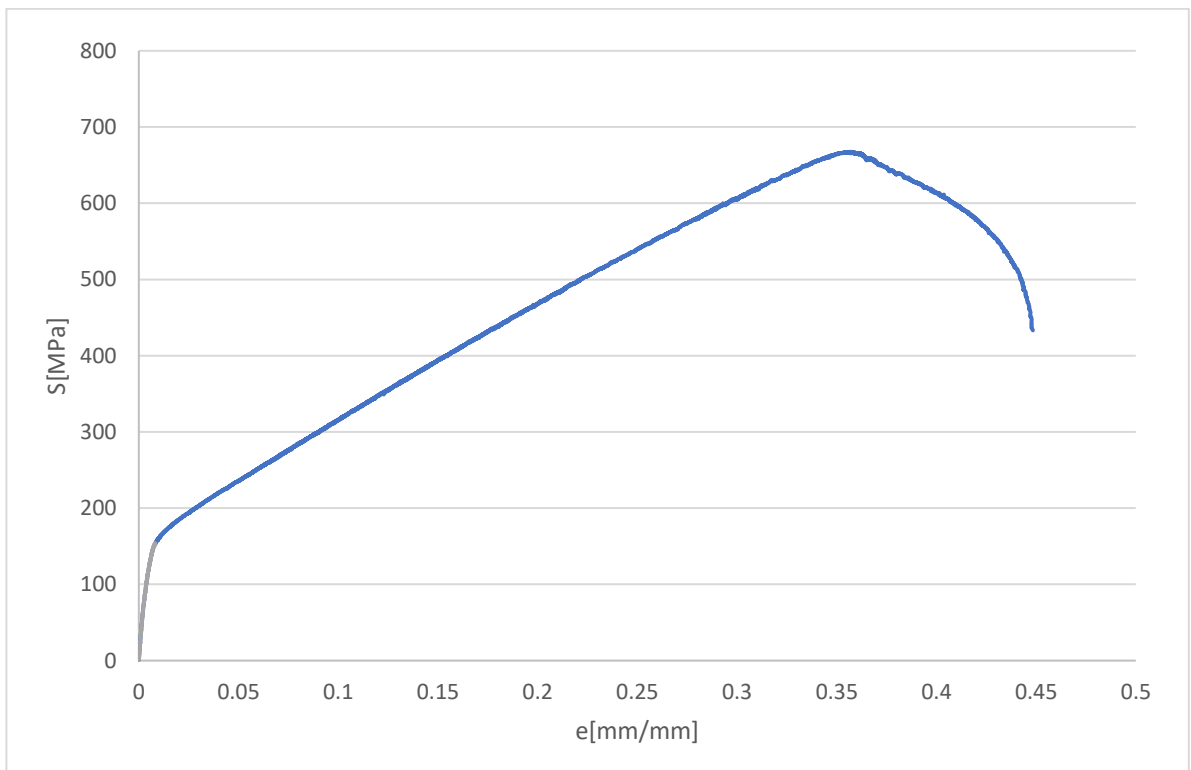
Anexo 2. Probeta de aluminio para el ensayo de indentación.



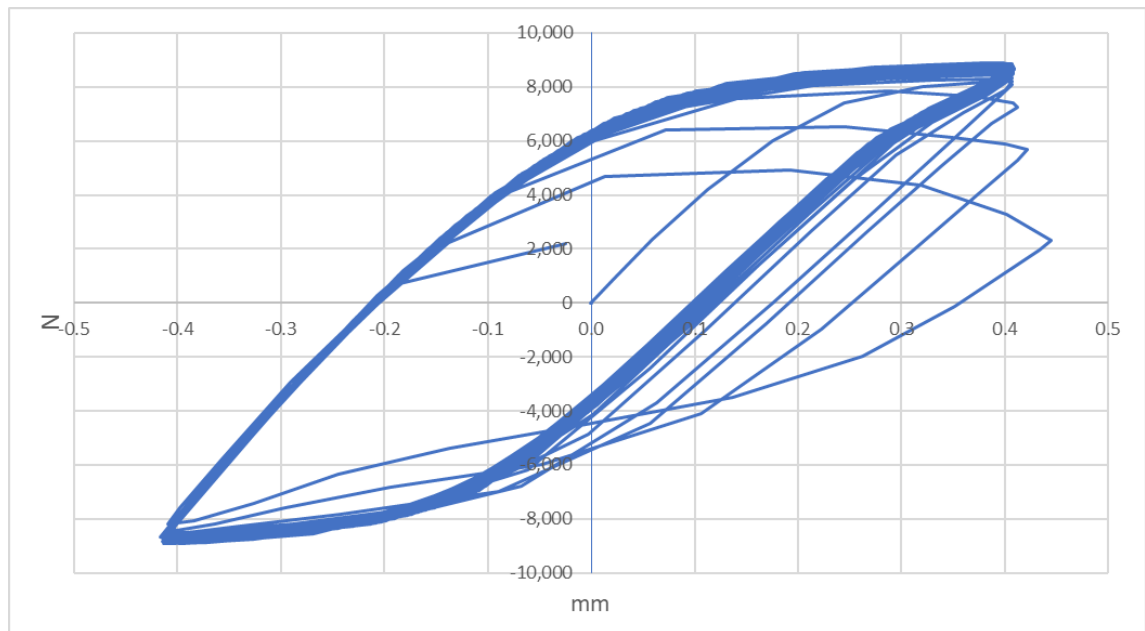
Anexo 3. Ensayo de tracción del aluminio.



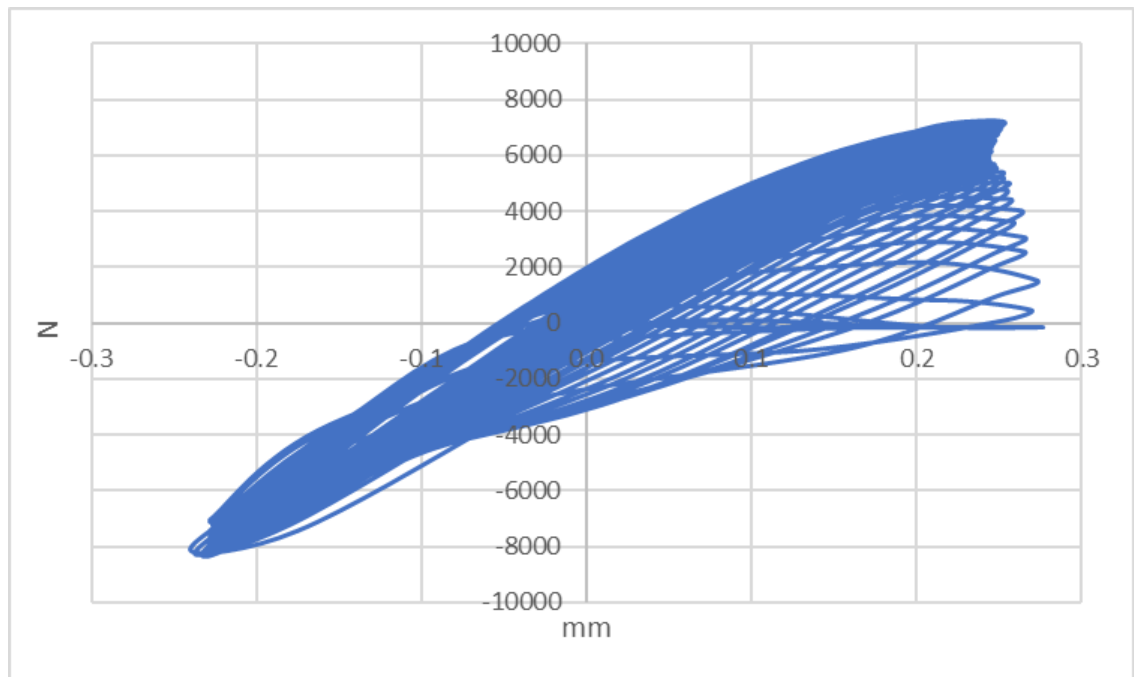
Anexo 4. Ensayo de tracción del acero.



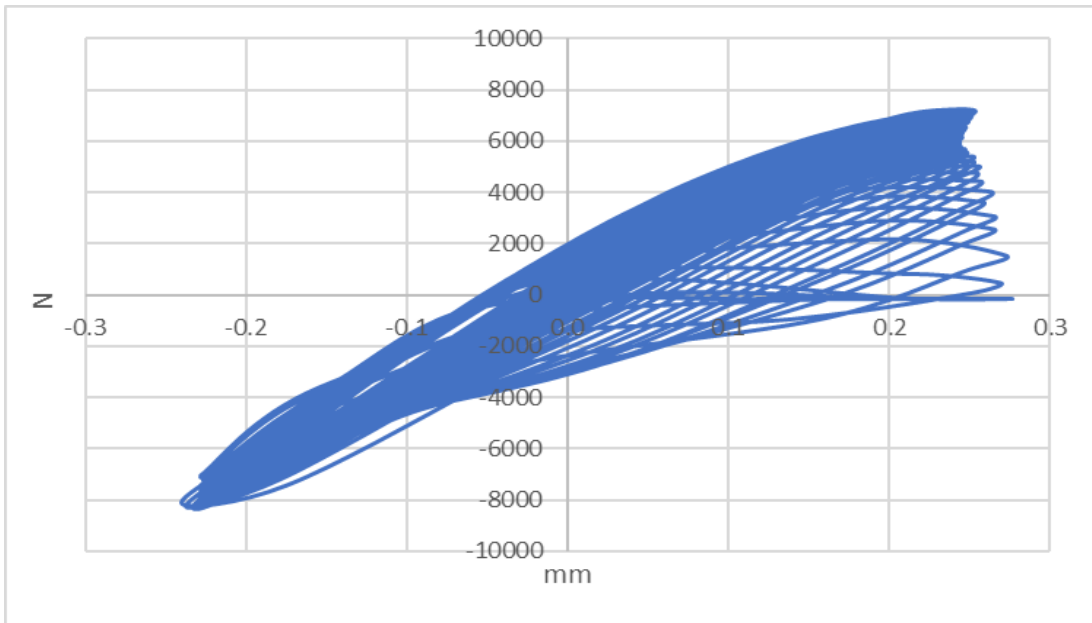
Anexo 5. Histéresis del aluminio a 82 ciclos y una deformación de 0.4236 mm, curva carga vs deformación.



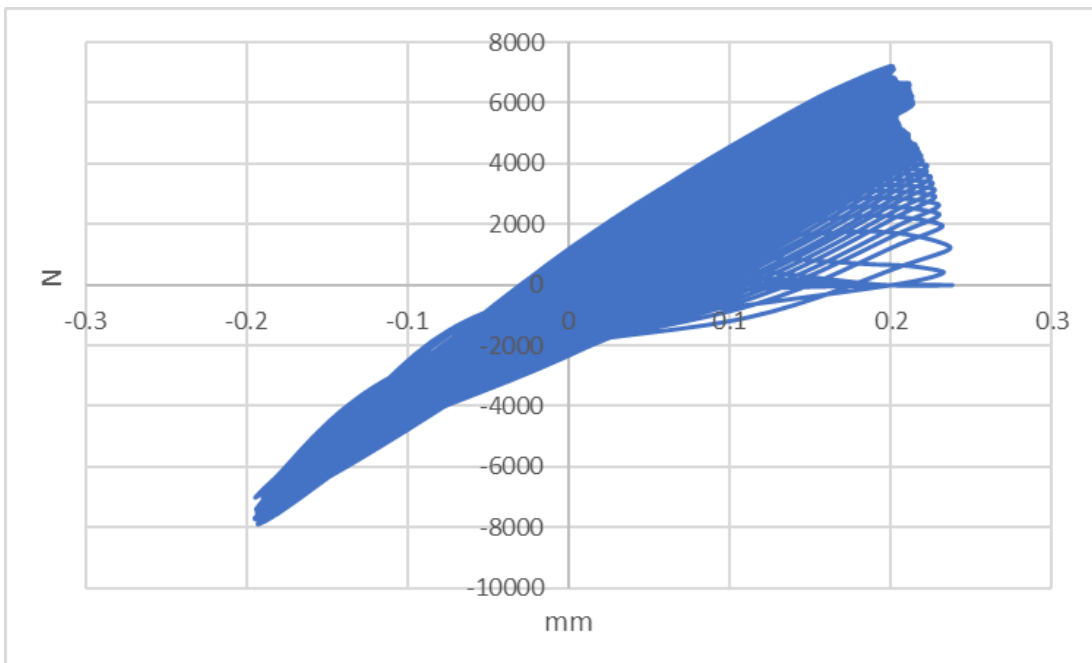
Anexo 6. Histéresis del aluminio a 609 ciclos y una deformación de 0.29075 mm, curva carga vs deformación.



Anexo 7. Histéresis del aluminio a 1656 ciclos y una deformación de 0.27 mm, curva carga vs deformación.



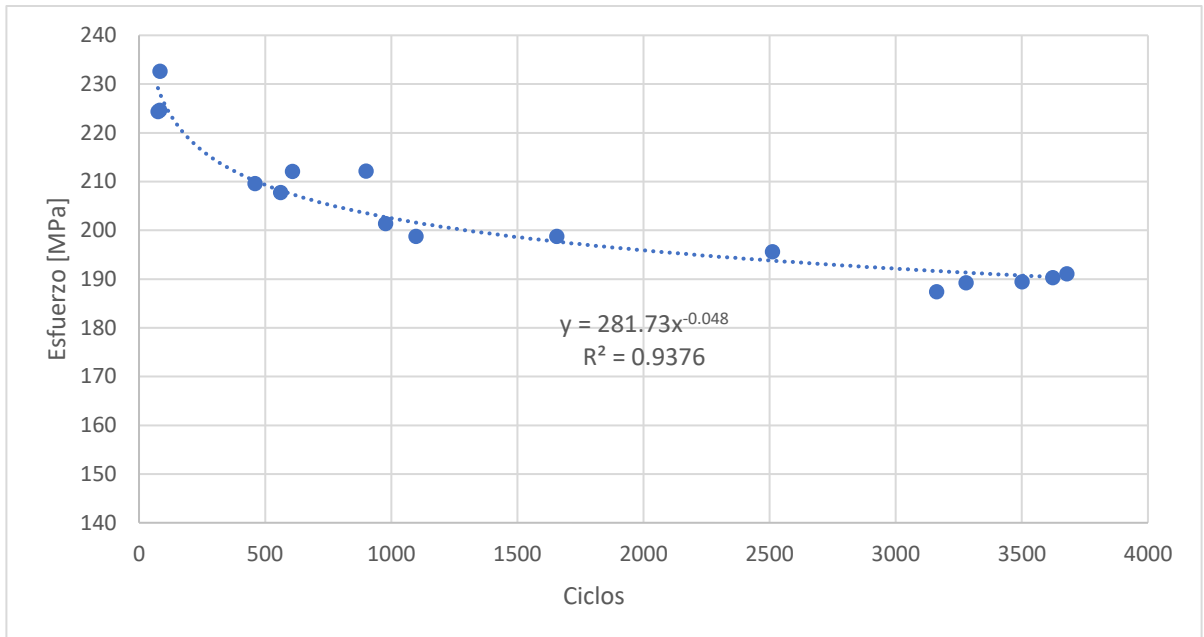
Anexo 8. Histéresis del aluminio a 3279 ciclos y una deformación de 0.235 mm, curva carga vs deformación.



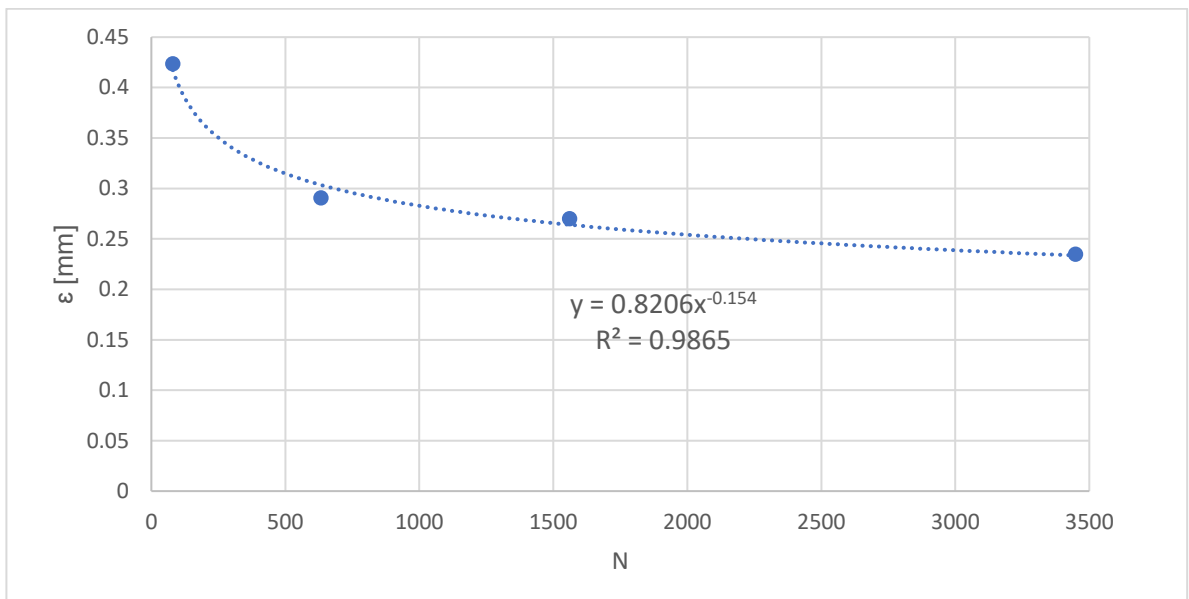
Anexo 9. Datos obtenidos de las pruebas de fatiga plástica del aluminio.

Aluminio								
	Deformación [mm]	Prueba	Fmax [N]	Fmin [N]	# de ciclos	Media	Área	Esfuerzo
Punto 1	(±) 0,4236	1	8607	-8685	82	8646	38.5	224.66
		2	8912.81	-8994.71	83	8953.76	38.5	232.65
		3	8167.32	-9101.5	75	8634.41	38.5	224.36
Punto 2	(±) 0,29075	4	8101.73	-8229.34	900	8165.535	38.5	212.17
		5	7425.39	-8707.93	460	8066.66	38.5	209.6
		6	7848.95	-8474.8	609	8161.875	38.5	212.08
		7	7908.36	-8083.33	562	7995.845	38.5	207.76
Punto 3	(±) 0,27	8	7059.71	-7994.61	2512	7527.16	38.5	195.58
		9	7513.41	-7783.53	1098	7648.47	38.5	198.74
		10	7596.93	-7700.08	1656	7648.505	38.5	198.74
		11	7639.36	-7860.8	978	7750.08	38.5	201.38
Punto 4	(±) 0,235	12	7090.61	-7474.81	3279	7282.71	38.5	189.23
		13	7080.77	-7342.7	3162	7211.735	38.5	187.39
		14	7129.16	-7518.78	3623	7323.97	38.5	190.3
		15	7103.21	-7602.18	3678	7352.695	38.5	191.05
		16	7091.34	-7489.64	3501	7290.49	38.5	189.43

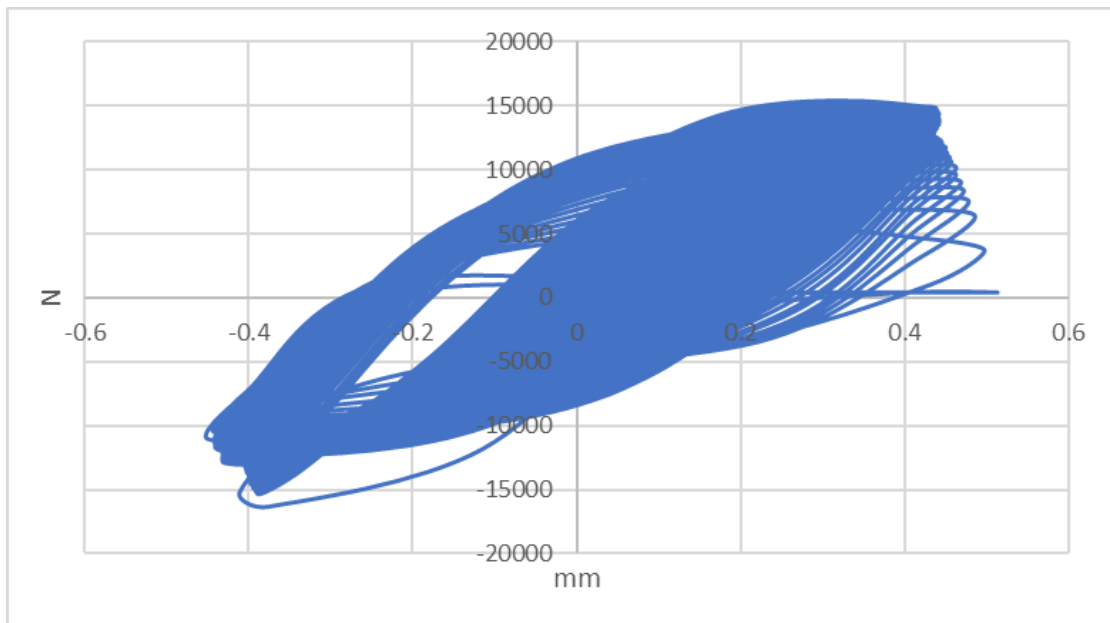
Anexo 10. Curva S-N_f en zona de bajos ciclos del aluminio.



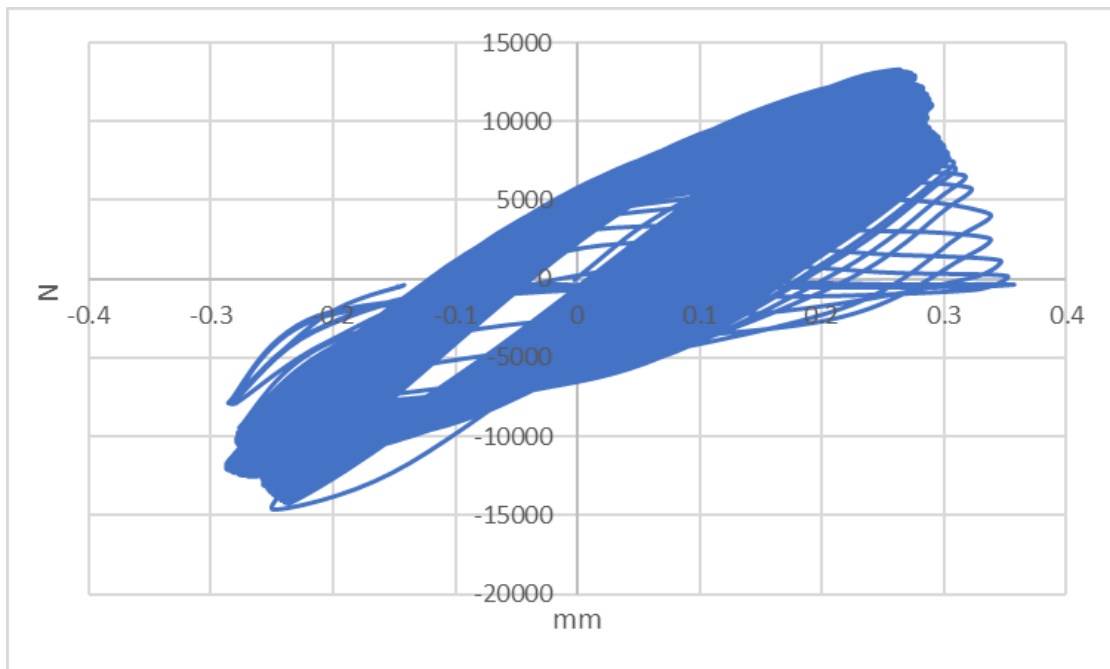
Anexo 11. Curva ϵ vs N_f zona de bajo ciclos del aluminio.



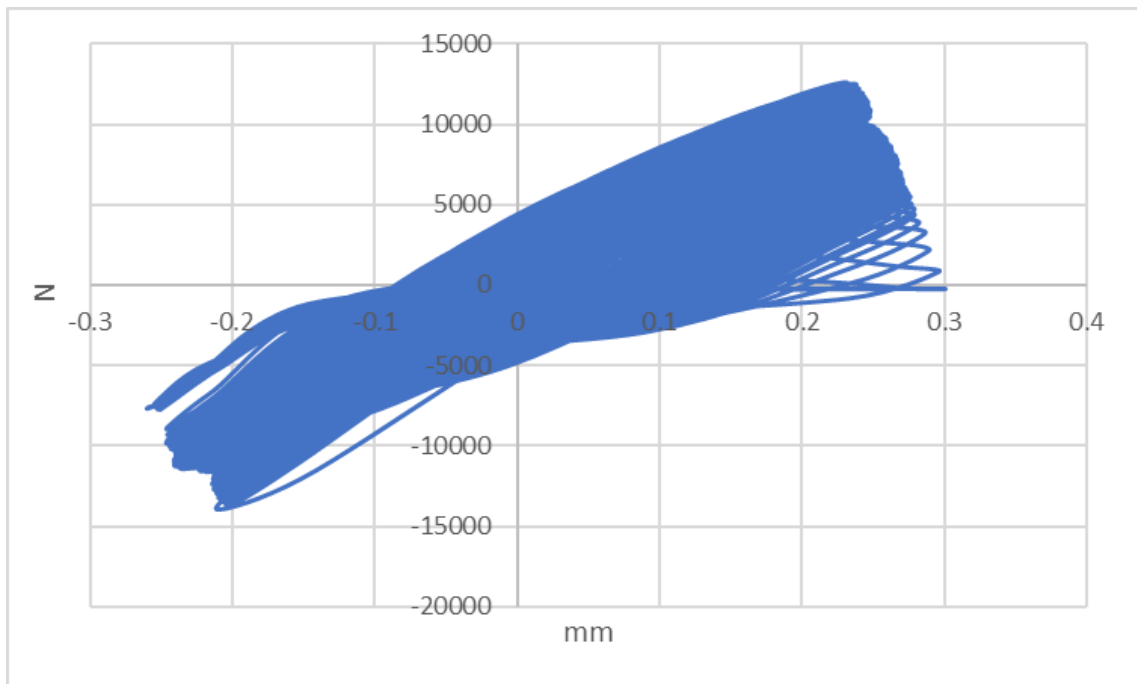
Anexo 12. Histéresis del acero a 156 ciclos y una deformación de 0.5 mm, curva carga vs deformación.



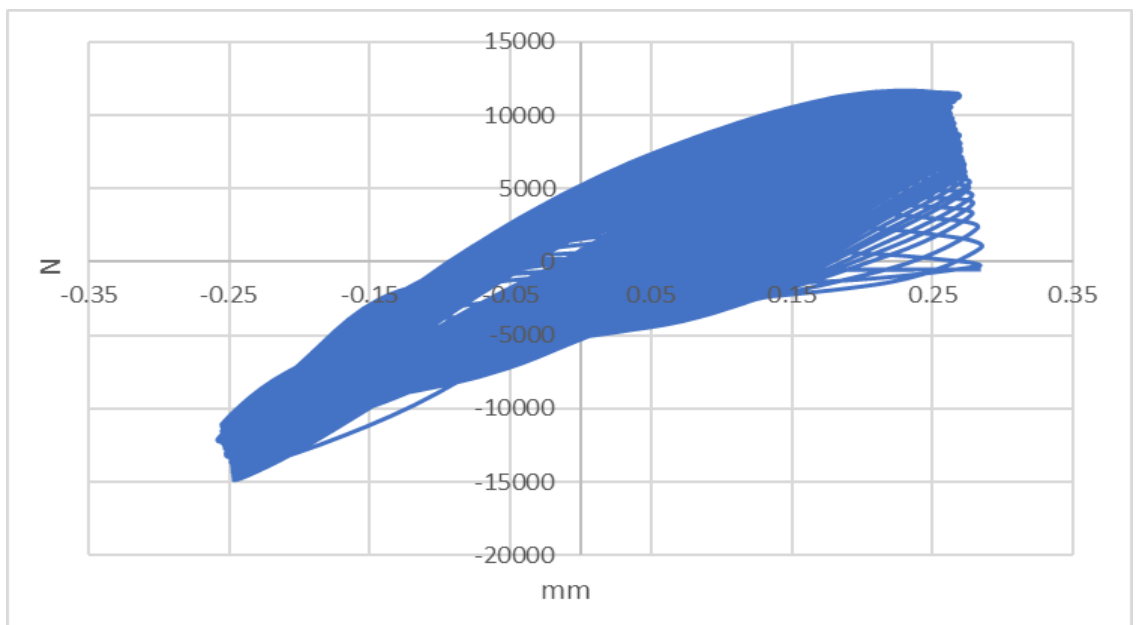
Anexo 13. Histéresis del acero a 691 ciclos y una deformación de 0.351 mm, curva carga vs deformación.



Anexo 14. Histéresis del acero a 1673 ciclos y una deformación de 0.3 mm, curva carga vs deformación.



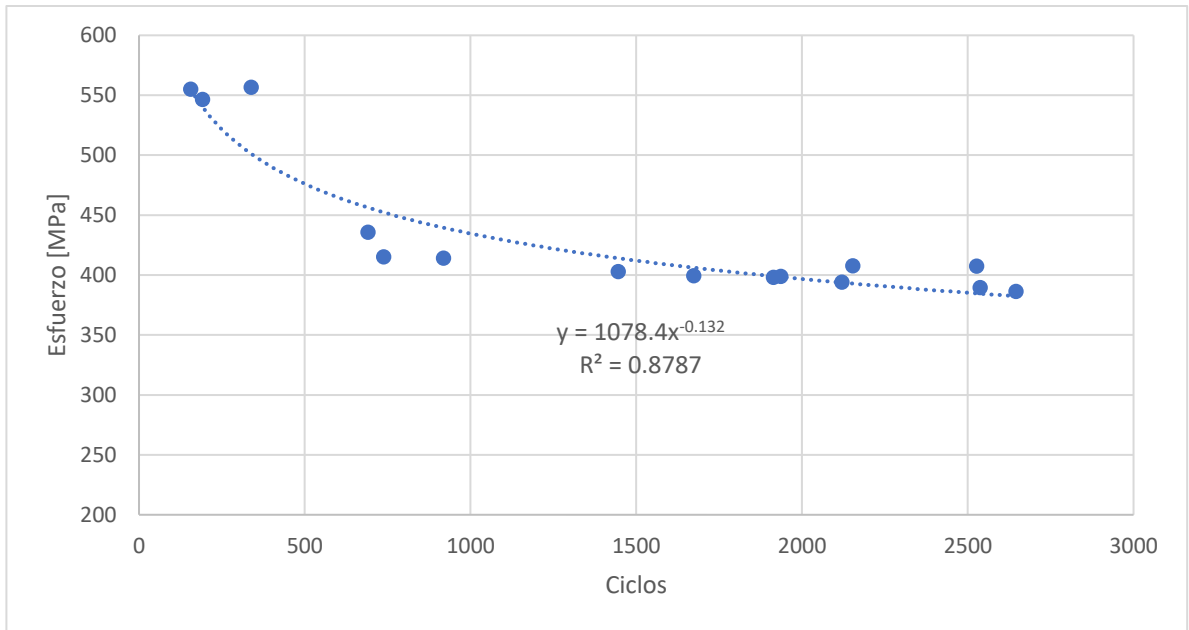
Anexo 15. Histéresis del acero a 2537 ciclos y una deformación de 0.285 mm, curva carga vs deformación.



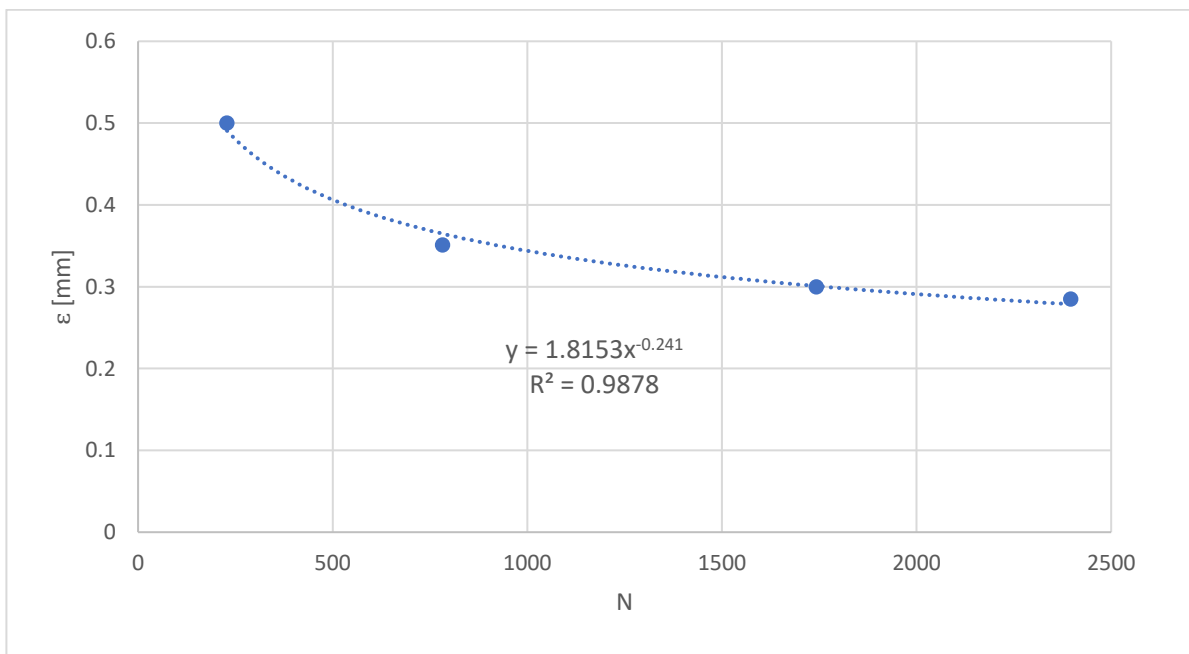
Anexo 16. Datos obtenidos de las pruebas de fatiga plástica del acero.

Aluminio							
Deformación	Prueba	Fmax [N]	Fmin [N]	# de ciclos	Media	Área	Esfuerzo
(±) 0,5	1	15702.8	-15683.78	156	15693.29	28.2744	555.03
	2	15582.36	-15896.4	338	15739.38	28.2744	556.66
	3	15767.67	-15139.16	191.5	15453.415	28.2744	546.55
(±) 0,351	4	12569.48	-12070.68	691	12320.08	28.2744	435.73
	5	11435.48	-11990.056	919	11712.768	28.2744	414.25
	6	11676.49	-11800.066	738	11738.278	28.2744	415.15
(±) 0,3	7	11417.45	-11363.9	1446	11390.675	28.2744	402.86
	8	11393.9	-11121.92	1914	11257.91	28.2744	398.16
	9	11195.15	-11357.81	1936	11276.48	28.2744	398.82
	10	11271.45	-11314.21	1673	11292.83	28.2744	399.4
(±) 0,285	11	11018.21	-11272.34	2120	11145.275	28.2744	394.18
	12	11070.37	-11984.51	2153	11527.44	28.2744	407.69
	13	11272.45	-11767.83	2527	11520.14	28.2744	407.44
	14	10697.56	-11149.02	2645	10923.29	28.2744	386.33
	15	10360.08	-11670.33	2537	11015.205	28.2744	389.58

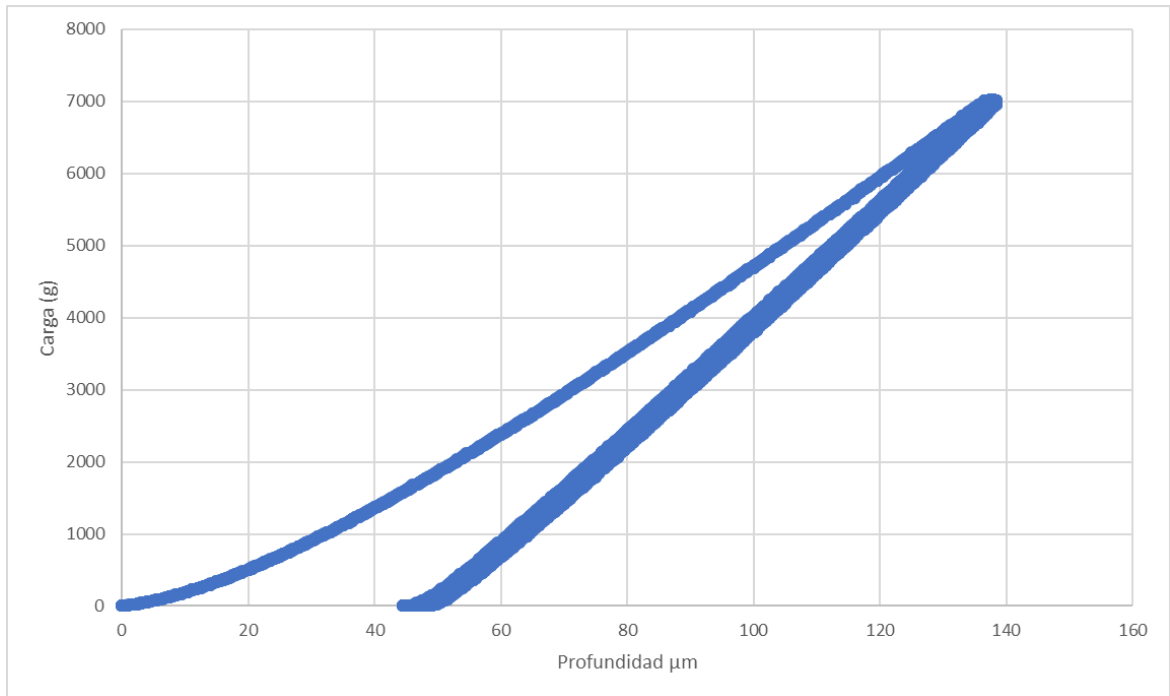
Anexo 17. Curva S-N_f en zona de bajos ciclos del acero.



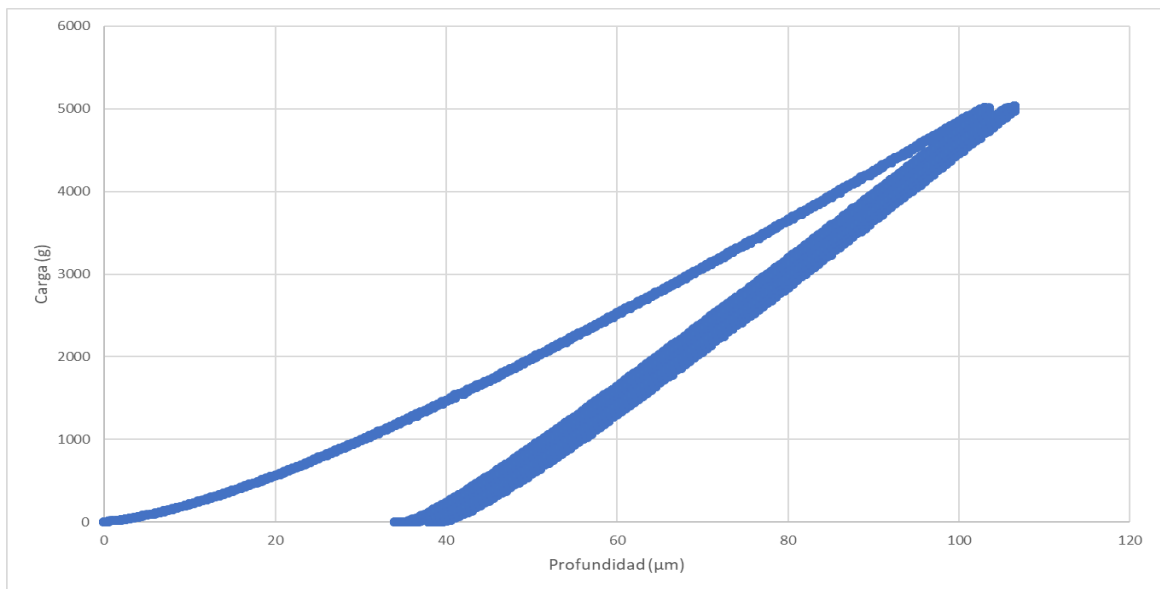
Anexo 18. Curva ϵ vs N_f zona de bajo ciclos del acero.



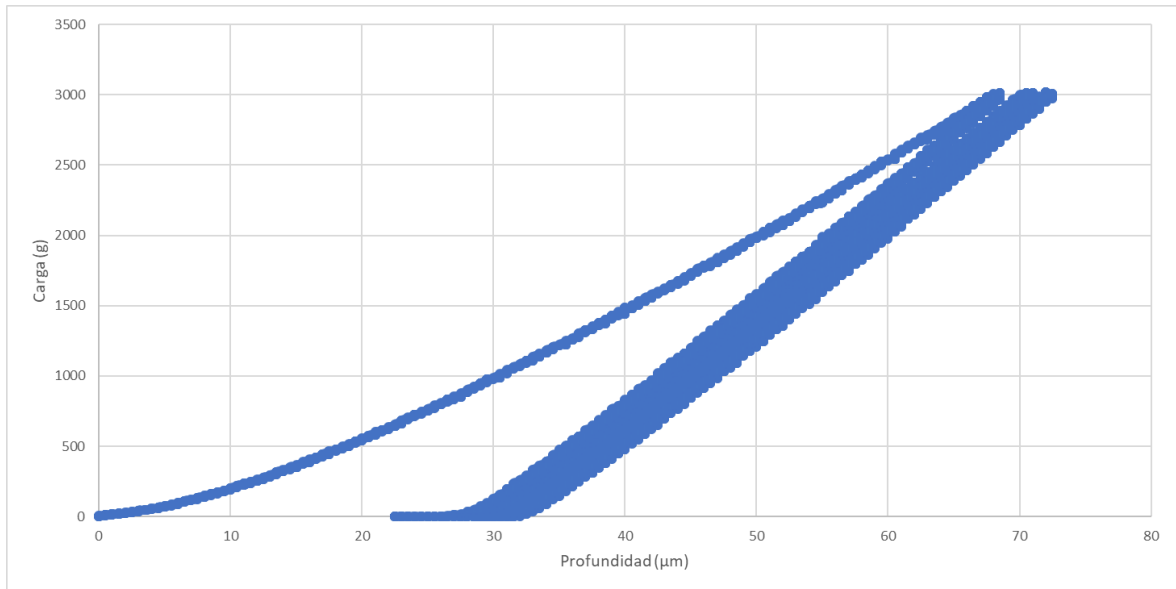
Anexo 19. Indentación instrumentada del aluminio con una carga de 7000 grs, curva carga vs profundidad.



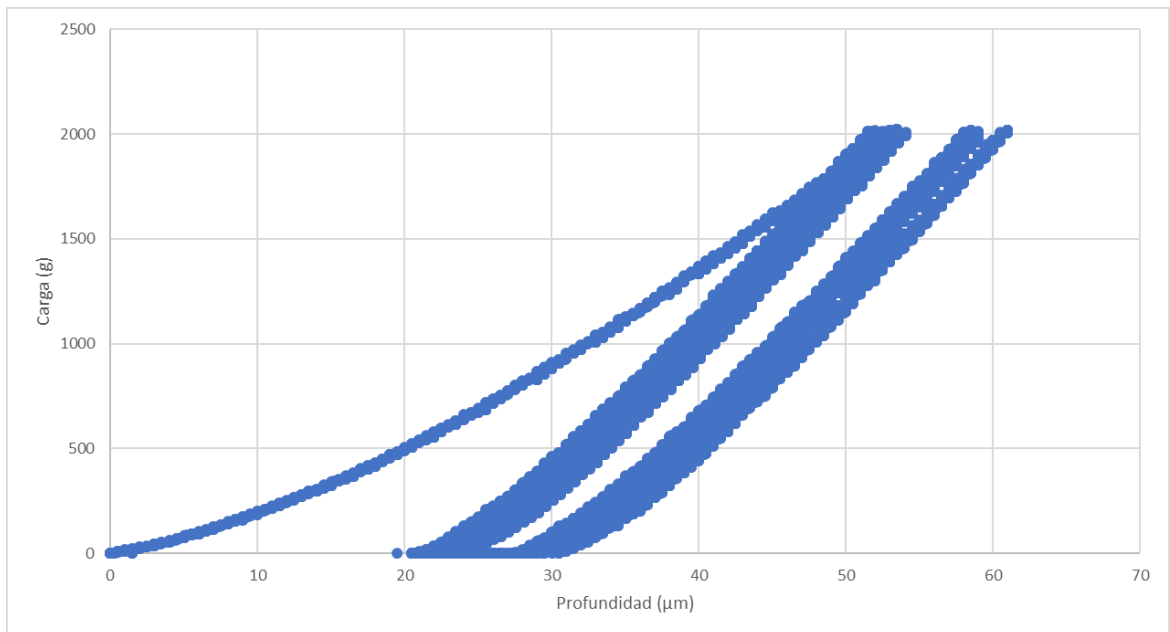
Anexo 20. Indentación instrumentada del aluminio con una carga de 5000 grs, curva carga vs profundidad.



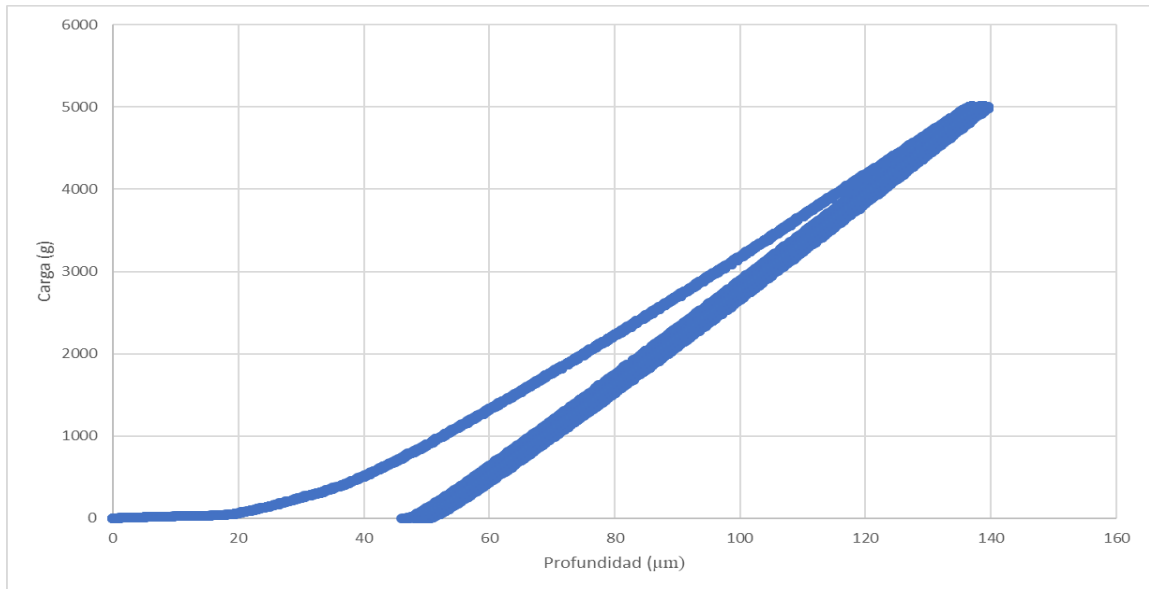
Anexo 21. Indentación instrumentada del aluminio con una carga de 3000 grs, curva carga vs profundidad.



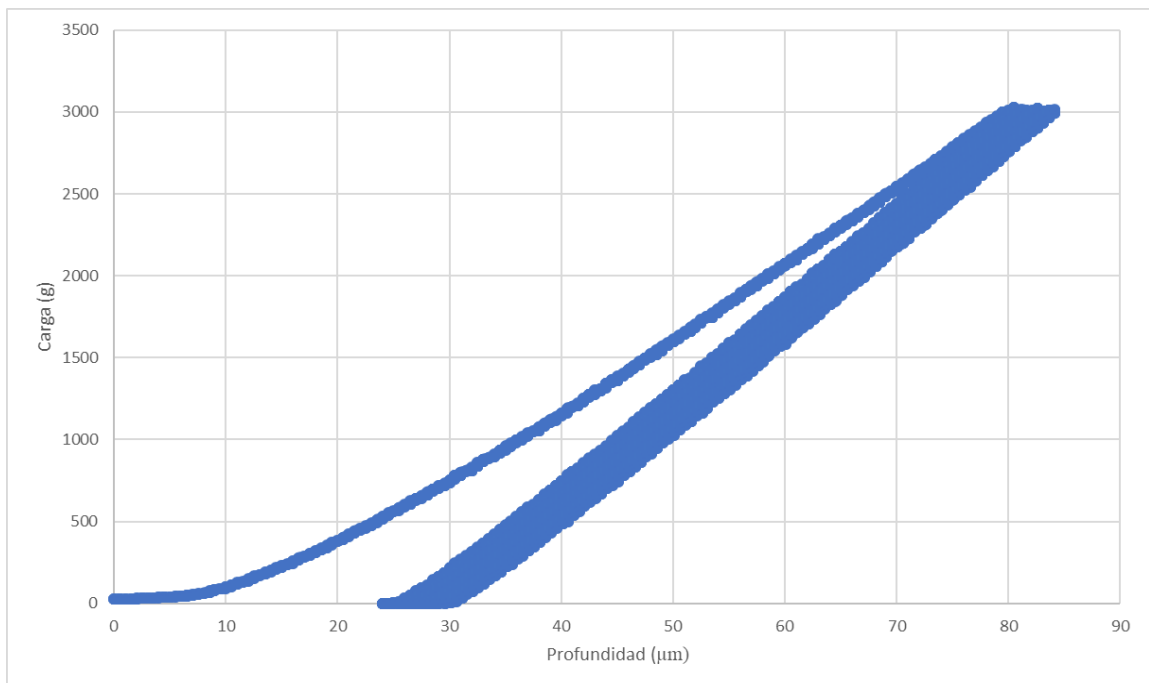
Anexo 22. Indentación instrumentada del aluminio con una carga de 2000 grs, curva carga vs profundidad.



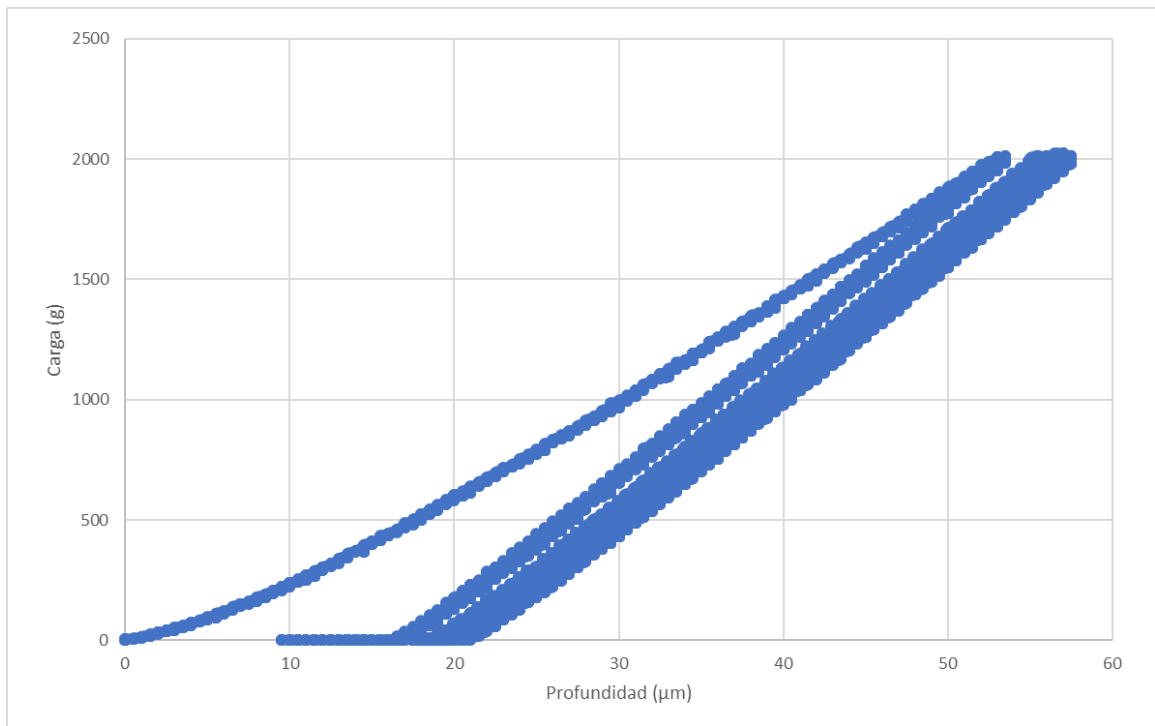
Anexo 23. Indentación instrumentada del acero con una carga de 5000 grs, curva carga vs profundidad.



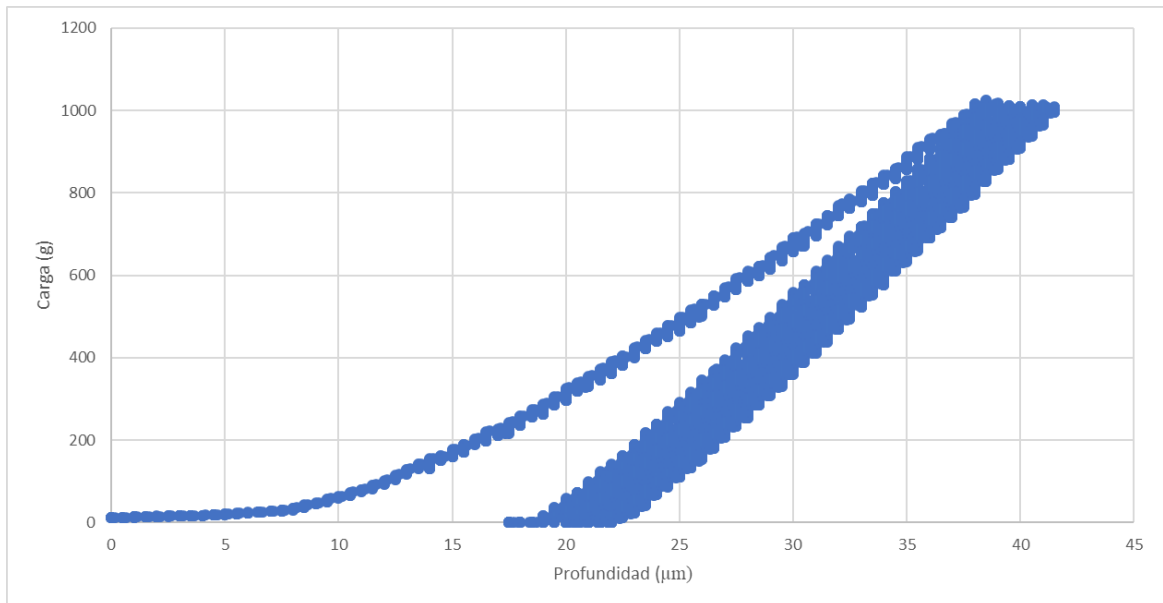
Anexo 24. Indentación instrumentada del acero con una carga de 3000 grs, curva carga vs profundidad.



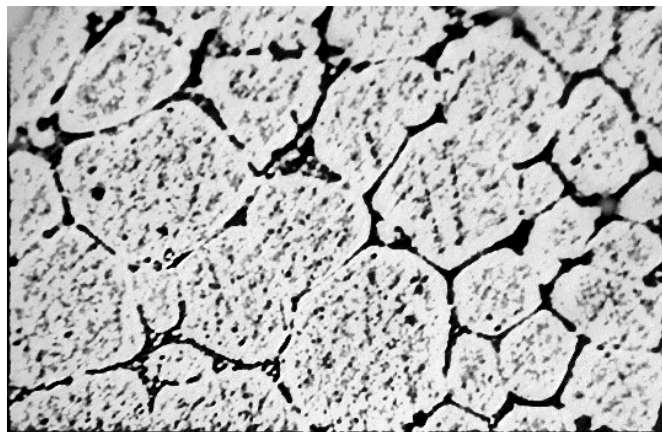
Anexo 25. Indentación instrumentada del acero con una carga de 2000 grs, curva carga vs profundidad.



Anexo 26. Indentación instrumentada del acero con una carga de 1000 grs, curva carga vs profundidad.



Anexo 27. Metalografía del aluminio.



Anexo 28. Metalografía del acero.



Longitudinal 250x



Longitudinal 1000x

